



**Universidad**  
Zaragoza



## Proyecto Fin de Carrera

# ANÁLISIS TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE LAS CARGAS DESCENTRADAS EN EL PROCESO DE INYECCIÓN Y SU INFLUENCIA SOBRE LA MÁQUINA

Autora

Montserrat Lanero Martínez

Director

Francisco Serraller Sánchez

Ingeniería Industrial

Escuela de Ingeniería y Arquitectura

Zaragoza, Diciembre del 2012



*A todas las personas que me han  
apoyado para llegar hasta aquí*



# **ANÁLISIS TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE LAS CARGAS DESCENTRADAS EN EL PROCESO DE INYECCIÓN Y SU INFLUENCIA SOBRE LA MÁQUINA**

## **Resumen**

---

El objetivo era analizar el efecto que tienen, sobre las columnas principalmente, la acción de fuerzas descentradas sobre un molde, en una máquina de inyección de plásticos, en las fases de cierre, inyección y compactación. El análisis se realiza tanto desde un punto de vista teórico como experimental.

Se ha explicado de qué partes consta y el funcionamiento de la unidad de cierre, así como los factores que influyen en la producción de piezas de plástico y las acciones desequilibradas que se dan durante el proceso de cierre e inyección.

En la parte teórica, se han utilizado las herramientas informáticas Moldflow (para la simulación de la inyección) y Pro/Engineer (tanto como herramienta de diseño como para el cálculo estructural). En la parte experimental, se ha utilizado la extensometría (para el análisis de datos adquiridos durante los ensayos).

Con Moldflow, se ha simulado el llenado y la compactación de una pieza, para hallar las cargas que afectan a las columnas y los platos de la máquina. Con Pro/Engineer se han dibujado todos los elementos necesarios. Mediante Pro/Mechanica se ha modelado la unidad de cierre a partir de las cargas obtenidas con Moldflow, para obtener los desplazamientos y las tensiones que sufren los componentes de la máquina en los procesos de cierre, inyección y compactación.

Se han producido piezas de uno y cuatro llaveros, en una máquina de inyección situada en el T.I.I.P., y se han medido mediante unas galgas extensométricas, el estiramiento de las columnas exteriores de la máquina durante el proceso, con lo que se han obtenido las tensiones sobre dichas columnas. Para la obtención de datos se ha necesitado un amplificador para extensometría DBK43A, un módulo de adquisición de datos Daqbook/100 Series. Con el software Strain Gage Calibration, se ha realizado la calibración de las galgas, y con Daqview, se ha visualizado su comportamiento. Se ha estudiado así, cómo se reparte la fuerza de cierre entre las cuatro columnas externas. También se ha inyectado una pieza con un molde diferente, como contraste con el anterior.

Una vez recopilados los resultados de las simulaciones y los ensayos, se ha procedido a su estudio y a la elaboración de las conclusiones, así como a analizar la aplicación de dichas conclusiones industrialmente, para la producción de piezas a otras escalas de fuerza o dimensiones, o bien, para la producción de piezas versionadas.



# Índice

---

## ***Parte I – Memoria***

<b>I.</b>	<b>Objeto y alcance del proyecto .....</b>	<b>Página I - 1</b>
<b>II.</b>	<b>Introducción.....</b>	<b>Página II - 1</b>
II.1.	Funcionamiento de la unidad de cierre.....	Página II - 1
II.1.1.	Ciclo de inyección.....	Página II - 1
II.1.2.	Elementos constituyentes principales .....	Página II - 2
II.1.3.	Cómo trabajan los constituyentes principales .....	Página II - 3
II.1.4.	Otros elementos constituyentes .....	Página II - 6
II.1.5.	Cálculo de la fuerza de cierre.....	Página II - 6
II.1.6.	Generación de la fuerza de cierre .....	Página II - 7
II.2.	El llenado - Acciones desbalanceadas.....	Página II - 9
II.2.1.	Fases del proceso de fabricación de una pieza de plástico en una máquina de inyección .....	Página II - 9
II.2.2.	Tensiones en una pieza .....	Página II - 9
II.2.3.	Sobrecompactación en relación a la máquina .....	Página II - 10
II.2.4.	Equilibrado de un molde.....	Página II - 10
II.2.5.	Enfriamiento de la pieza .....	Página II - 10
II.2.6.	Colada .....	Página II - 10
<b>III.</b>	<b>Aplicación de métodos teóricos.....</b>	<b>Página III - 1</b>
III.1.	Simulación del proceso de inyección con Moldflow .....	Página III - 1
III.1.1.	Creación del modelo en Pro/Engineer .....	Página III - 1
III.1.2.	Simulación de llenado y compactación en Moldflow.....	Página III - 1
III.1.3.	Conclusiones .....	Página III - 10
III.2.	Modelado mecánico en Pro/Mechanica de las unidades de cierre.....	Página III - 10
III.2.1.	Proceso de creación del modelo de la máquina de inyección en Pro/Engineer y simplificaciones realizadas .....	Página III - 10
III.2.2.	Simulación mecánica de la unidad de cierre en Pro/Mechanica.....	Página III - 11
III.2.3.	Conclusiones .....	Página III - 17
<b>IV.</b>	<b>Aplicación del método experimental.....</b>	<b>Página IV - 1</b>
IV.1.	Descripción de la técnica.....	Página IV - 1
IV.1.1.	Principios de la extensometría .....	Página IV - 2

IV.2.	Medidas .....	Página IV - 2
IV.2.1.	Proceso del ensayo experimental .....	Página IV - 2
IV.2.2.	Resultados.....	Página IV - 3
IV.2.3.	Conclusiones .....	Página IV - 5
<b>V.</b>	<b>Aplicación industrial .....</b>	<b>Página V - 1</b>
V.1.	Simulación de llenado y compactación en Moldflow .....	Página V - 1
V.1.1.	Parámetros de estudio .....	Página V - 1
V.1.2.	Resultados.....	Página V - 3
<b>VI.</b>	<b>Conclusiones.....</b>	<b>Página VI - 1</b>
<b>VII.</b>	<b>Bibliografía y nomenclatura .....</b>	<b>Página VII - 1</b>

## ***Parte II – Anexos***

<b>i.</b>	<b>Inyección.....</b>	<b>Página i - 1</b>
i.1.	Otros elementos constituyentes de la máquina de inyección .....	Página i - 1
i.1.1.	Expulsión .....	Página i - 1
i.1.2.	Elementos obligatorios .....	Página i - 1
i.1.3.	Dispositivos auxiliares necesarios u opcionales ...	Página i - 2
i.1.4.	Sistemas de seguridad .....	Página i - 2
i.2.	Factores que influyen en la presión de inyección.....	Página i - 3
i.3.	Equilibrado de un molde .....	Página i - 4
i.4.	Enfriamiento de la pieza .....	Página i - 5
i.5.	Colada.....	Página i - 5
<b>ii.</b>	<b>Resultados de los métodos teóricos .....</b>	<b>Página ii - 1</b>
ii.1.	Resultados de la simulación en Moldflow.....	Página ii - 1
ii.2.	Resultados de la simulación en Pro/mecánica.....	Página ii - 10
<b>iii.</b>	<b>Resultados del método experimental .....</b>	<b>Página iii - 1</b>
iii.1.	Principios de la extensometría.....	Página iii - 1
iii.2.	Descripción del proceso de preparación de los dispositivos .....	Página iii - 2
iii.2.1.	Colocación del equipo de medida .....	Página iii - 2
iii.2.2.	Preparación de la máquina de inyección y el molde .....	Página iii - 4
iii.2.3.	Ensayo.....	Página iii - 5



iii.3.	Resultados .....	Página iii - 6
iii.3.1.	Cálculo de las fuerzas que sufren las columnas.....	Página iii - 6
iii.3.2.	Fuerzas de cierre obtenidas en los ensayos.....	Página iii - 9
iv.	<b>Resultados de la aplicación industrial.....</b>	<b>Página iv - 1</b>
v.	<b>Hoja de características de la máquina de inyección del TIIP .....</b>	<b>Página v - 1</b>
vi.	<b>Hoja de características de las galgas extensométricas.....</b>	<b>Página vi - 1</b>



## ***Parte I – Memoria***



# I – Objeto y alcance del proyecto

---

Se trata de analizar el efecto que tienen sobre los platos y las columnas de las máquinas de inyección de plásticos, la acción de fuerzas descentradas sobre el molde, en las fases de cierre, inyección y compactación.

A lo largo del proyecto se explican el funcionamiento de la unidad de cierre y las acciones desequilibradas que se dan durante el proceso de cierre e inyección. El análisis se basa en resultados de ensayos realizados con programas de cálculo por elementos finitos, comparados con resultados empíricos en una máquina de inyección real. Este objetivo se puede desglosar en los siguientes apartados:

- 1) Simulaciones del llenado y la compactación de una pieza, mediante el software Moldflow [1], para hallar las cargas (descentradas) que afectan a las columnas y los platos de la máquina. Los casos que se plantean son:
  - molde con cuatro figuras, en el que sólo se inyecta material en una de ellas
  - figuras desequilibradas
  - sobrecompactación
- 2) Dibujo de todos los elementos necesarios en el software Pro/Engineer [2].
- 3) Modelado con la aplicación Pro/Mechanica, por elementos finitos, de la unidad de cierre en su conjunto para cada uno de los casos, a partir de las cargas obtenidas en las simulaciones de llenado.
- 4) Obtención los desplazamientos y las tensiones que sufren los componentes de la máquina para las situaciones más desfavorables en los procesos de cierre, inyección y compactación.
- 5) Parte experimental, en una máquina situada en el Taller de Inyección de la Industria de los Plásticos (T.I.I.P.) [3], se mide mediante unas galgas extensométricas, el estiramiento de las columnas durante la inyección en un molde de cuatro figuras, del que se dispone en el taller, con lo que se obtienen las tensiones sobre dichas columnas. Se estudia así, cuánto sufren los elementos del sistema, considerados elementos elásticos, a través de criterios de rigidez y de elasticidad. Para esta tarea son necesarios un amplificador para extensometría DBK43A, un módulo de adquisición de datos Daqbook/100 Series y los software Strain Gage Calibration [4], con el que se realiza la calibración de las galgas, y Daqview [5], con el que se visualiza el comportamiento de las mismas.
- 6) Se analizan los resultados teóricos comparándolos con los obtenidos experimentalmente.
- 7) A partir de los resultados, adicionalmente, se estudiará un ejemplo con un proyecto realizado industrialmente con otra máquina de diferente fuerza de cierre, a fin de observar un comportamiento común para distintas escalas de máquina y molde, en el proceso de inyección. En la práctica, se podrá prever cómo se ve afectada una máquina cualquiera, durante la inyección de un determinado molde, mediante una simulación que aplique las relaciones a las que da lugar la comparación de los resultados teóricos y experimentales.

Este análisis cubre los diferentes casos que se dan en la industria, como moldes descentrados, versionados, en los que se ha introducido una modificación en una pieza, o moldes de dos cavidades que trabajan fabricando sólo la de la derecha o sólo la de la izquierda dependiendo de la aplicación.



## II – Introducción

---

### II.1. Funcionamiento de la unidad de cierre [6]

La unidad de cierre es un conjunto de dispositivos de la máquina de inyección, encargados de abrir y cerrar el molde, así como de ejercer presión, para contrarrestar la ejercida por el plástico inyectado en el interior del molde, manteniéndolo cerrado de forma efectiva, como una junta estanca, para evitar fugas de material y la formación de rebabas.

#### II.1.1. Ciclo de inyección

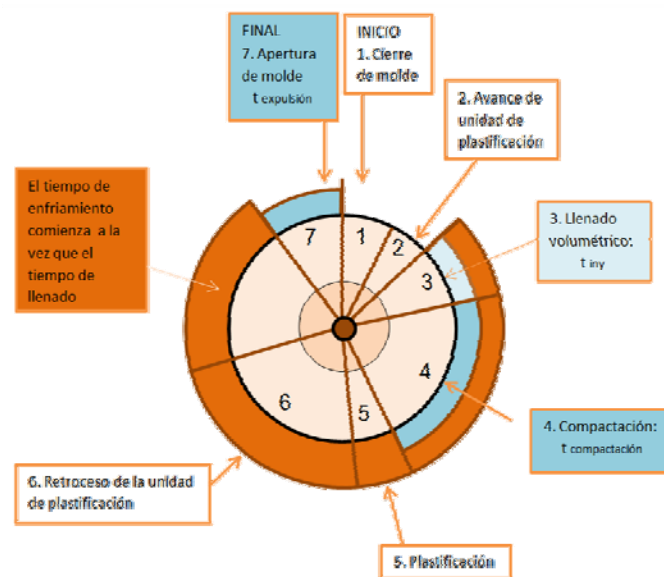


Figura II.1. Fases del ciclo de inyección

En las fases de cierre:

- Avance rápido acercando las dos mitades del molde
- Cierre lento mediante el cual las mitades del molde entran en contacto
- Aplicación de la fuerza de cierre

En las fases de apertura:

- Movimiento rápido de apertura
- Frenado de la apertura debido a la inercia que provoca la masa del grupo de cierre
- Expulsión de la pieza

La unidad de cierre del molde aplica la fuerza de cierre, desde que está cerrado el molde (final fase 1) hasta que se abre (inicio fase 7), pero sólo se mueve en las fases de apertura y cierre de molde.

### II.1.2. Elementos constituyentes principales

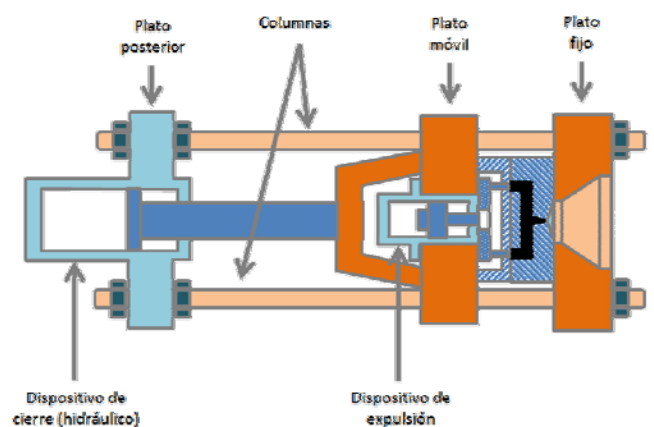


Figura II.2. Elementos principales de la máquina de inyección<sup>1</sup>

Dispositivo apertura/cierre	Mecánico (de rodillera simple o doble), hidráulico o mixto.
Plato fijo	Debe cuidarse en su diseño y robustez, dado que están sometidos a fatiga.  El plato fijo es la referencia principal de la máquina.
Plato móvil	Debe cuidarse también su rigidez, ya que las deformaciones elásticas que puede sufrir pueden llegar a originar rebabas, por holguras en la zona central del molde acoplado.  El sistema de expulsión va unido a él.
Plato posterior	Debe cuidarse en su diseño y robustez, dado que están sometidos a fatiga.
Columnas	Son pasantes, hacen de guía y equilibran.  Sujetas por tuerca (normalmente cónica) al plato fijo y al posterior, no solidarias al plato móvil (son las guías del mismo).  El plato fijo es solidario a la bancada de la máquina, el móvil está colgado de las columnas, el plato posterior está apoyado en una superficie de la bancada.  Sufren estiramiento durante la aplicación de la fuerza de cierre y contrarrestan el empuje ejercido por el material que llena la cavidad del molde.  Trabajan principalmente a tracción (a compresión cuando se abre el molde).  Deben ser rígidas y su diámetro es el parámetro vital en su diseño.

Tabla II.1. Componentes de la máquina de inyección

<sup>1</sup> Todos los platos del grupo de cierre tienen que ser perfectamente paralelos, y los elementos de unión (las columnas) tienen que ser perfectamente perpendiculares a ellos, las tolerancias de fabricación han de ser pequeñas.



### II.1.3. Cómo trabajan los constituyentes principales

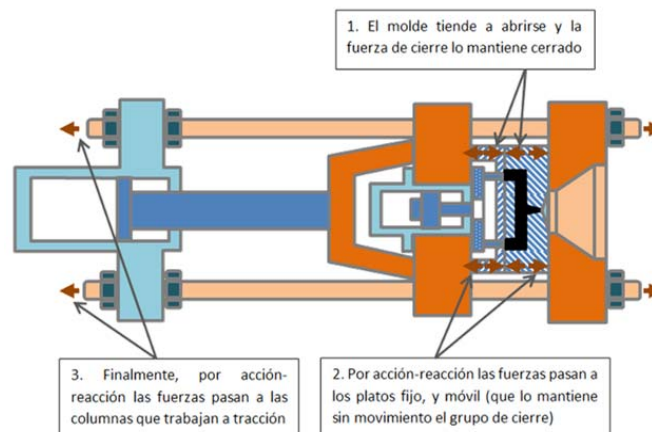


Figura II.3. Fuerza de cierre a través de la máquina de inyección

La máquina consta de una pared o plato fijo, que actúa como referencia de cota cero, ya que está atornillada a la bancada. Soporta las inercias (transmitiéndolas a la bancada), las acciones de cierre que van a las columnas y las acciones del grupo de plastificación que va fijado al plato fijo.

Las dos mitades del molde se mantienen cerradas gracias al plato móvil de la máquina. Una parte del molde va amarrada al plato fijo, y la otra parte al plato móvil.

Las encargadas de evitar que los platos se muevan y de aguantar la fuerza, son las columnas. Las columnas tienen un estiramiento, debido a la fuerza de cierre. Si en algún momento, en los patines de los platos se introduce otra acción diferente del estiramiento de las columnas, debido a que los platos no estén perfectamente paralelos, se pueden producir flexiones dañinas que pueden derivar en roturas.

En el cierre hidráulico, el origen de la fuerza de cierre se encuentra un pistón fijado al plato móvil, el vástago del pistón empuja al plato móvil, sobre el que está montada una mitad del molde, hacia la otra mitad (sujeta al plato fijo).

#### Ley de Hooke

Todos los elementos de la máquina de inyección se pueden considerar elásticos.

La Ley de Hooke establece que el alargamiento unitario que experimenta un material elástico es directamente proporcional a la fuerza aplicada,  $F$ :

$$\varepsilon = \frac{\delta}{L} = \frac{F}{A \cdot E} \quad \text{Ecuación II.1.}$$

Donde  $\delta$  es la variación que experimenta la longitud o alargamiento,  $L$  es la longitud del resorte,  $E$  es el módulo de Young del material del resorte y  $A$  representa el área transversal ( $E_{acero} = 2.1 \cdot 10^5 \text{ MPa}$ ):

$$A = \pi \cdot r^2 \quad \text{Ecuación II.2.}$$

Representando  $r$  el radio del resorte.

Otra forma de representar la Ley de Hooke es mediante la ecuación del muelle, donde se relaciona la fuerza ejercida sobre el resorte con el alargamiento producido:

$$F = -k \cdot \delta \quad \text{Ecuación II.3.}$$

Donde  $k$  es la constante elástica o rigidez del resorte.

Todos los elementos de la máquina siguen la ley de los muelles.

Si el sistema está equilibrado, la fuerza del material sobre el molde se contrarresta por la fuerza de cierre, evitando que éste se abra y se fugue el material plástico. El caso ideal es que todas las columnas funcionen por igual y la fuerza de cierre se reparta entre las cuatro, recibiendo cada una  $\frac{F_c}{4}$ .

La inyección y la fuerza de cierre son las responsables del alargamiento de las columnas.

### Criterio de Rigidez o Elasticidad

Si el estiramiento de la columna es:

$$\sum \varepsilon = \delta \quad \text{Ecuación II.4.}$$

En una columna:

$$\frac{F_c}{4} = k_{columna} \cdot \delta \quad \text{Ecuación II.5.}$$

$$k = \frac{E \cdot A}{L} \quad \text{Ecuación II.6.}$$

A continuación se va a proceder a calcular la rigidez de los componentes de la máquina de inyección a los que se le transmiten las fuerzas.

Elemento	$L$ (mm)	$D$ (mm)	$h$ (mm)	$b$ (mm)	Área (mm <sup>2</sup> )
Columnas externas	932	60	-	-	2827.43
Columnas internas	380	30	-	-	706.86
Amarre (fijo y móvil)	22	-	260	210	54600
Regle	52	-	260	26	6760
Sufridera y pared del molde (fija y móvil)	27	-	260	175	45500

Tabla II.2. Longitud, diámetro, alto, ancho y área de componentes de la máquina.

Para las columnas externas de la máquina:

$$\frac{1}{k_{columnas}} = \frac{1}{4 \cdot k_{columnas\ internas}} + \frac{1}{4 \cdot k_{columnas\ externas}} \quad \text{Ecuación II.7.}$$

Sustituyendo los valores de  $k$  para la máquina del T.I.I.P. que se ha utilizado:

$$k_{columnas\ externas} = \frac{2.1 \cdot 10^5 \cdot 2827.43}{932} = 0.637082 \frac{MN}{mm}$$

$$k_{columnas\ internas} = \frac{2.1 \cdot 10^5 \cdot 706.86}{380} = 0.390632 \frac{MN}{mm}$$

Y para el molde:

$$\frac{1}{k_{molde}} = \frac{1}{k_{amarre\ móvil}} + \frac{1}{2 \cdot k_{regles}} + \frac{1}{k_{sufridera}} + \frac{1}{k_{molde\ móvil}} + \frac{1}{k_{molde\ fijo}} + \frac{1}{k_{amarre\ fijo}}$$

Ecuación II.8.

Sustituyendo los valores de  $k$  para el molde del T.I.I.P. que se ha utilizado:

$$k_{amarre\ móvil} = \frac{2.1 \cdot 10^5 \cdot 54600}{22} = 521.18 \frac{MN}{mm} = k_{amarre\ fijo}$$

$$k_{regle} = \frac{2.1 \cdot 10^5 \cdot 6760}{52} = 27.3 \frac{MN}{mm}$$

$$k_{sufridera} = \frac{2.1 \cdot 10^5 \cdot 45500}{27} = 353.89 \frac{MN}{mm} = k_{molde\ móvil} = k_{molde\ fijo}$$

Es decir,  $k_{columnas} = 0.968616 \frac{MN}{mm}$  y  $k_{molde} = 32.648064 \frac{MN}{mm}$ , el molde es mucho más rígido que las columnas.

Por construcción, los moldes se fabrican para que su rigidez sea mucho mayor que la de las columnas, de modo que haya un coeficiente de seguridad muy alto. La relación entre las rigideces de estos componentes es de 33.71 para el molde frente a 1 para las columnas.

### Criterio de Resistencia

Debemos introducir un coeficiente de seguridad:

$$\frac{F_c/4}{A} = \sigma < \sigma_{adm}$$

Ecuación II.9.

En una representación de la fuerza de cierre frente al desplazamiento que sufren las columnas y el molde, la intersección entre la recta correspondiente al alargamiento de la columna y la correspondiente al acortamiento del molde da lugar al punto de cierre del molde, a la derecha del cual se produce el estiramiento del molde (lo cual no es posible), o bien, éste se abre, lo que da lugar a fugas del material<sup>2</sup>.

En las máquinas de inyección hidráulicas, la fuerza de cierre se consigue metiendo presión hidráulica y bloqueando la misma mediante un cierre hidráulico. El molde es muy rígido, lo cual impide que se transmita gran parte de la fuerza de cierre a las columnas.

<sup>2</sup> En las máquinas hidráulicas hay válvulas de seguridad, que en el momento que se supera la presión de seguridad en el circuito hidráulico, hacen que el cilindro de cierre retroceda y como consecuencia se abre el molde.

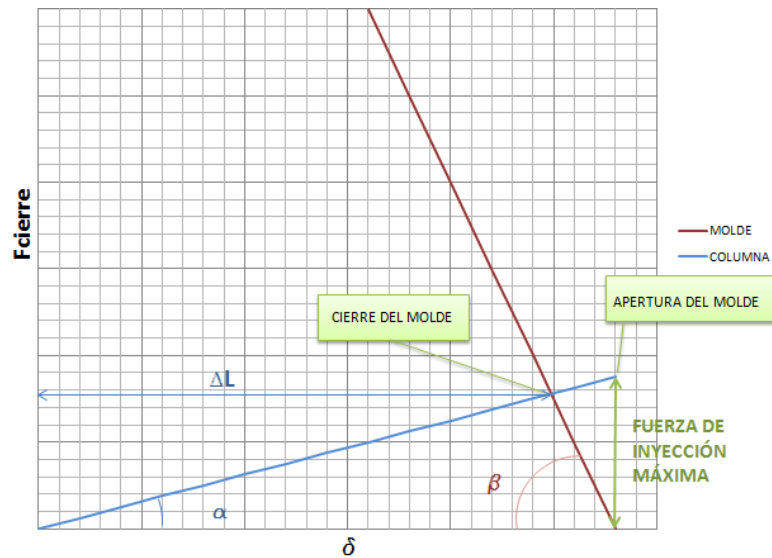


Figura II.4. Fuerza de cierre frente al desplazamiento sufrido por las columnas en las máquinas hidráulicas

Siendo:

$$\tan \alpha = k_{\text{columnas}} \quad \text{Ecuación II.10.}$$

$$\tan \beta = k_{\text{molde}} \quad \text{Ecuación II.11.}$$

#### II.1.4. Otros elementos constituyentes

- Expulsión
  - Extracción mecánica
  - Extracción hidráulica
- Elementos obligatorios
- Dispositivos auxiliares necesarios u opcionales
- Sistemas de seguridad
  - Protección personal
  - Protección del molde

Para una explicación más detallada de estos elementos, consultar el anexo i - Inyección.

#### II.1.5. Cálculo de la fuerza de cierre

La fuerza de cierre de la máquina de inyección se puede obtener mediante:

- a) Simulación, por medio del cálculo por elementos finitos
- b) Métodos estimativos, utilizando la siguiente fórmula:

$$F_c = A_p \cdot \frac{P_m}{1000} f \quad \text{Ecuación II.12.}$$

Factores que sí tiene en cuenta

Longitud  
Espesor  
Material  
Área Proyectada

Factores que no tiene en cuenta

Material Exacto  
Diseño de Molde  
Parámetros de Inyección

Al inyectar una caja o un cubo con unas dimensiones y con un espesor, es necesario calcular el área proyectada, la longitud máxima de flujo. A través del espesor, el tipo de material y la longitud máxima de flujo, se puede determinar la presión media, y con ella la fuerza de cierre si se considera un factor de seguridad  $f = 1.5$ .

- ☞ A mayores presiones → Mayores fuerzas de cierre
- ☞ En líneas generales, los mayores valores de presión se alcanzan al finalizar la fase de llenado, no en la compactación.
- ☞ Sin embargo las mayores fuerzas de cierre se alcanzan en la fase de compactación, aunque los valores de presión en la pieza sean menores.

$$F_c = \int P_i \cdot ds = P_m \int ds = P_m \cdot A_p \quad \text{Ecuación II.13.}$$

En el llenado, se obtienen valores de presión altos. La presión de la pieza no está repartida homogéneamente, existiendo zonas de presión nula.

En el caso de la compactación, el valor de presión en la pieza baja, pero es un valor relativamente alto repartido en la totalidad de la pieza. El sumatorio de presión en toda la superficie proyectada de la pieza, que da lugar a la fuerza de cierre necesaria, es mayor, mientras que el sumatorio de presiones en el llenado es menor, y por lo tanto da lugar a una fuerza de cierre menor (la presión media es menor que en compactación).

### II.1.6. Generación de la fuerza de cierre

Algunos sistemas de generación de fuerza de cierre para máquinas de inyección son:

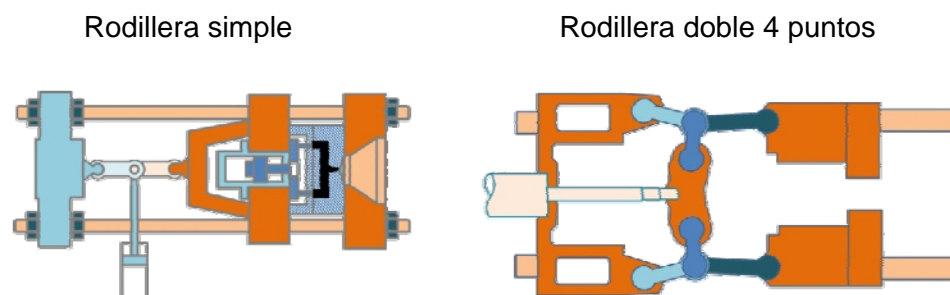
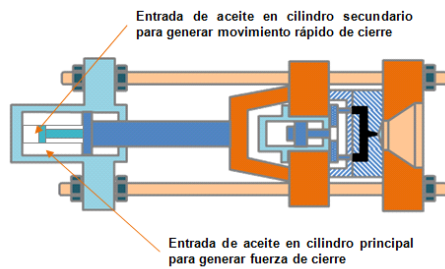
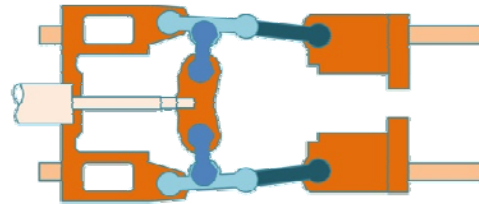


Figura II.5. Tipos de sistemas de cierre

### Diferentes sistemas hidráulicos



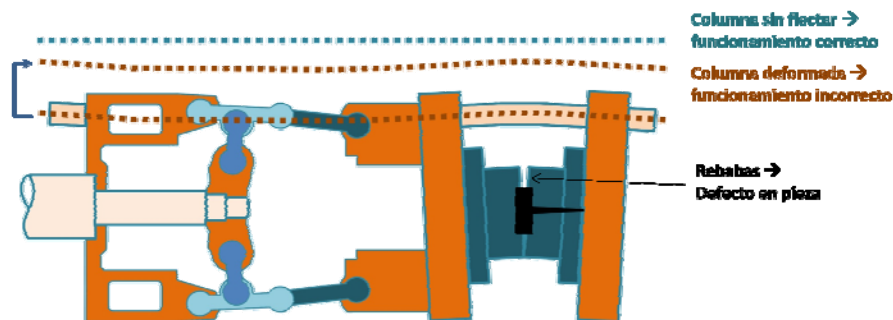
### Rodillera doble 5 puntos



*Figura II.5. Tipos de sistemas de cierre*

Otros sistemas: mixto, sin columnas, de revolver, de disco, de dos platos.

Cuando la fuerza de cierre no está centrada, los platos pierden el paralelismo y, al abrir y cerrar, obligan a las columnas a flexar, haciéndolas trabajar de una manera para la que no están diseñadas. Aunque es más importante el desequilibrio debido a la carga, que puede derivar en que una columna no se lleve  $\frac{1}{4}$  de la fuerza de cierre, sino mucho más. Se puede producir fatiga por la carga y descarga de las columnas (trabajan principalmente a tracción y a compresión cuando se abre el molde, en la tracción las grietas tienden a abrirse).



*Figura II.6. Comparación entre columna sin flexar y columna deformada*

## Sistemas hidráulicos

La máquina que se va a utilizar funciona con un sistema de cierre hidráulico.

En ocasiones supone una gran cantidad de litros de aceite a mover, además de ser un sistema con grandes carreras de apertura (máquinas que ocupan mucho espacio). Se deben diseñar el cilindro y el pistón de una longitud adecuada.

La fuerza de cierre se aplica directamente desde el pistón, por lo que su cálculo es sencillo.

Se puede mejorar el sistema colocando cilindros auxiliares, para conseguir mayor rendimiento de potencia, y mejores velocidades. En este caso es mayor el volumen de aceite a mover, y existe mayor riesgo de fugas de aceite. Existen también máquinas con cierres eléctricos para que no exista el problema de las fugas.

## II.2. El llenado - Acciones desbalanceadas [7]

Durante la fabricación de una pieza por el proceso de inyección se han de estudiar una serie de factores que influyen en la optimización de dicho proceso. Se ha de analizar rigurosamente el diseño de la pieza y del molde necesario para inyectarla, el objetivo es conseguir la mejor calidad posible con el menor coste.

Una relación de factores que influyen en la presión de inyección, así como una ampliación teórica sobre el equilibrado del molde, el enfriamiento de la pieza y la colada, se puede encontrar en el anexo i – Inyección.

### II.2.1. Fases del proceso de fabricación de una pieza de plástico en una máquina de inyección

1. Llenado
2. Presurización: El plástico es un material muy compresible. Durante el llenado, la cavidad puede llenarse del 95 % al 100 % y, posteriormente, se aplica presión para forzar al plástico a llenar completamente la cavidad.
3. Compensación: Se compensa la contracción del material mientras éste está en estado líquido.

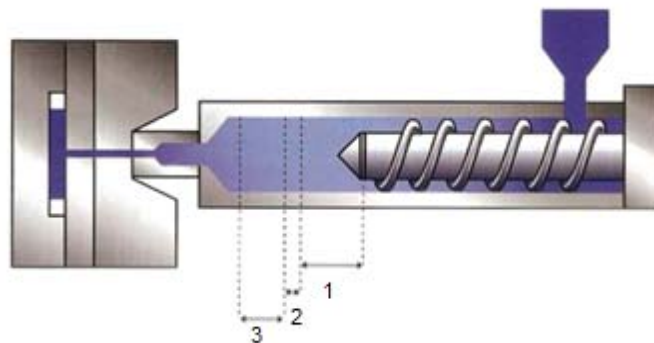


Figura II.7. Fases del moldeo por inyección

### II.2.2. Tensiones en una pieza

Antes de la inyección debe haberse definido la calidad de la pieza. Se busca una mínima tensión residual.

Generalmente, las piezas que están sometidas a una compactación alta durante un periodo de tiempo corto sufren menos tensión que aquellas con una compactación menor durante un periodo de tiempo más largo.

La principal causa de tensión en las piezas de plástico es la combinación del fluir del material y de su contracción al mismo tiempo, lo cual ocurre en la fase de compensación.

La sobrecompactación es la causa más común de alabeo en las piezas y está provocada por el enfriamiento a alta presión de zonas de las piezas donde el flujo se ha detenido durante el llenado. El flujo desequilibrado da lugar a la sobrecompactación, y

por tanto al alabeo, tanto en moldes de una figura, como en moldes multicavidad, o en moldes con familias de cavidades. El flujo llenará siempre primero por el camino que le sea más fácil de atravesar (las zonas menos estrechas), y cuando una región está llena, ésta se compacta mientras el material alcanza otras áreas. Es decir, hay regiones de un molde que se sobrecompactan mientras el resto se termina de llenar. Este proceso causa mucha tensión .

### *II.2.3. Sobrecompactación en relación a la máquina*

Cuando el llenado es simétrico, no aparecen desequilibrios en cuanto a la fuerza de cierre. Una condición necesaria para que el llenado sea simétrico es que el molde sea simétrico. Si el llenado no es simétrico, aparece sobrecompactación en las zonas que primero se llenan, es decir, estas zonas sufren más presión.

La sobrecompactación provoca el desequilibrio respecto a las acciones en las columnas, ya sea por que el molde no es simétrico, o porque el molde no llena de forma simétrica, o a una fabricación defectuosa del molde, moldes multiunidad, etc., en definitiva, porque el molde a su vez está desequilibrado.

Un molde desequilibrado da lugar a una resultante de acciones que no está centrada respecto al centro de la máquina (columnas, bebedero...), luego se generan momentos, si la resultante de fuerzas estuviera en el centro no se generarían momentos.

### *II.2.4. Equilibrado de un molde*

Todo el molde debería llenar al mismo tiempo y a la misma presión. Para moldes multicavidad, esto significa que cada una de las cavidades debería llenar al mismo tiempo. Sucede lo mismo con las partes internas o extremo de una sola cavidad.

En realidad, el tiempo de inyección es generalmente el factor limitante del equilibrado. Lo ideal es que la sección a atravesar sea lo más grande posible y longitudinalmente lo más corta posible.

### *II.2.5. Enfriamiento de la pieza*

El enfriamiento del material comienza a la vez que el llenado. Respecto al enfriamiento, interesa que las piezas sean lo más uniformes posible en cuanto al espesor, además, cuanto más delgadas sean antes se enfriarán.

### *II.2.6. Colada*

Los canales de alimentación están diseñados para que cada posición del molde llene al mismo tiempo y presión. Cuando la colada se usa para equilibrar el flujo, la presión total en la colada que se introduce para el equilibrado y la caída de presión en la cavidad deben ser iguales. Si se cambia el sistema de colada, se alterará la caída de presión en la cavidad. Cuanto más uniforme sea el equilibrio entre cavidades, mejor será la calidad de las piezas y más sencillo será el proceso. Para una mayor presión de equilibrado se requiere menor diámetro del canal.



## III – Aplicación de métodos teóricos

---

Mediante el software Moldflow, se simula el llenado y la compactación de una pieza, para hallar las cargas que afectan a las columnas y los platos de la máquina. Con el software Pro/Engineer, mediante la herramienta Pro/Mechanica, se modela la unidad de cierre a partir de las cargas obtenidas con Moldflow, para obtener los desplazamientos y las tensiones que sufren los componentes de la máquina en los procesos de cierre, inyección y compactación.

### ***III.1. Simulación de las cargas en Moldflow***

#### ***III.1.1. Creación del modelo en Pro/Engineer***

La modelización de la pieza, consiste en dibujar en Pro/Engineer cada una de sus partes y posteriormente trasladar el modelo obtenido a Moldflow para realizar la simulación del llenado y compactación de dicha pieza.

Para obtener un modelo en Pro/Engineer, se parte de las dimensiones de la pieza que se quiere obtener. Se dibuja de la forma más simplificada posible. Para la pieza que se va a estudiar, y que se inyecta en el T.I.I.P., se obtiene la siguiente geometría:



*Figura III.1. Pieza obtenida en Pro/Engineer*

#### ***III.1.2. Simulación de llenado y compactación en Moldflow***

Una vez obtenida la geometría, se exporta en formato \*.igs al programa de simulación Moldflow. En este caso se trabaja en Dual Domain, una forma cálculo aproximado que permite obtener resultados válidos para la pieza que nos ocupa. Se diseñan los canales de entrada. Los canales dibujados, están compuestos de cámara caliente y de entrada. La cámara caliente hace que el plástico fundido no se enfríe en el recorrido que le lleva desde la boquilla del husillo hasta la cavidad del molde.

La geometría de la pieza, una vez diseñados los canales de entrada y hecho el mallado, con un tamaño de malla que permita reproducir fielmente la pieza a la vez que obtener resultados más ajustados (aproximadamente un tamaño de triángulos de 2.5mm), tiene el siguiente aspecto:



*Figura III.2. Geometría de pieza obtenida en Moldflow para la inyección de 1 figura (izquierda), geometría de pieza obtenida en Moldflow para la inyección de 4 figuras (derecha)*

### Parámetros de estudio

Se definen los casos en Moldflow. Para ello se introducen los parámetros de la máquina correspondientes. Para la fabricación de una pieza se ha de programar la máquina de inyección de acuerdo a unas condiciones determinadas de presión y temperatura del material, las cuales varían según los objetivos que se quieran cumplir con la pieza a nivel de acabado, alabeo, etc.

El molde del T.I.I.P. con el que se trabaja, permite inyectar cuatro figuras o menos. Se van a analizar dos casos, la inyección de cuatro figuras y la inyección de una figura.

La fuerza de cierre que se aplica es la máxima de la máquina (55 Tm), la necesaria para que no se abra el molde, para la que corresponde la presión máxima (175 Bar). Si se supera la fuerza de cierre máxima, entra tanto plástico que hace que el molde se abra, y se producen rebabas.

El material utilizado es PPU X9067 HS: Basell Polyolefins, se encuentra a 240 °C.

Del mismo modo que en el ensayo experimental, primero se observa el llenado general, cuando el molde llena al 95 % aproximadamente, se ha de alcanzar la presión máxima para la inyección de la pieza correspondiente. La presión de compactación suele estar entre el 40-60 % de la presión máxima. La compactación se hace para controlar la contracción de la pieza. En estas condiciones de inyección la compactación hace que la presión sea uniforme en toda la pieza. Llenan antes las partes más gruesas de la pieza, ya que ofrecen menos resistencia, luego son más propensas a sobrecompactación.

#### Condiciones inyección 4 figuras:

El tiempo de llenado es 0.6 s.

- Segunda fase de compactación a 14.8 Bar.
- Segunda fase de compactación a 22.2 Bar.
- Segunda fase de compactación a 29.6 Bar.

#### Condiciones inyección 1 figura:

El tiempo de llenado es 0.26 s.

- Segunda fase de compactación a 15 Bar.
- Segunda fase de compactación a 20 Bar.
- Segunda fase de compactación a 27 Bar.

Los datos introducidos, son los parámetros reales de la máquina durante la producción, pero ajustados al caso simulado, ya que en la realidad se tienen en cuenta pérdidas de presión en los conductos.

## Resultados

Los resultados obtenidos de la simulación en Moldflow son los siguientes:

- Distribución del llenado en diferentes momentos
- Presión en el punto de cambio de fase
- Presión en el punto de inyección
- Presión máxima
- Distribución de presiones
- Evolución de la presión, en los nodos más representativos
- Distribución de las temperaturas al final del llenado
- Evolución de la temperatura promedio, en los nodos más representativos
- Fuerza de cierre a lo largo del ciclo
- Centroide de la fuerza de cierre
- Líneas de soldadura
- Contracción volumétrica

De cara a este proyecto se van a analizar los resultados correspondientes a las presiones y la fuerza de cierre. El resto de los resultados pueden observarse en el anexo ii – Resultados de los métodos teóricos.

La fuerza de cierre a lo largo del ciclo, permite saber cuál es la fuerza que realiza el plástico en el interior de la cavidad del molde cuando se inyecta.

A continuación se presentan los resultados principales obtenidos con Moldflow:

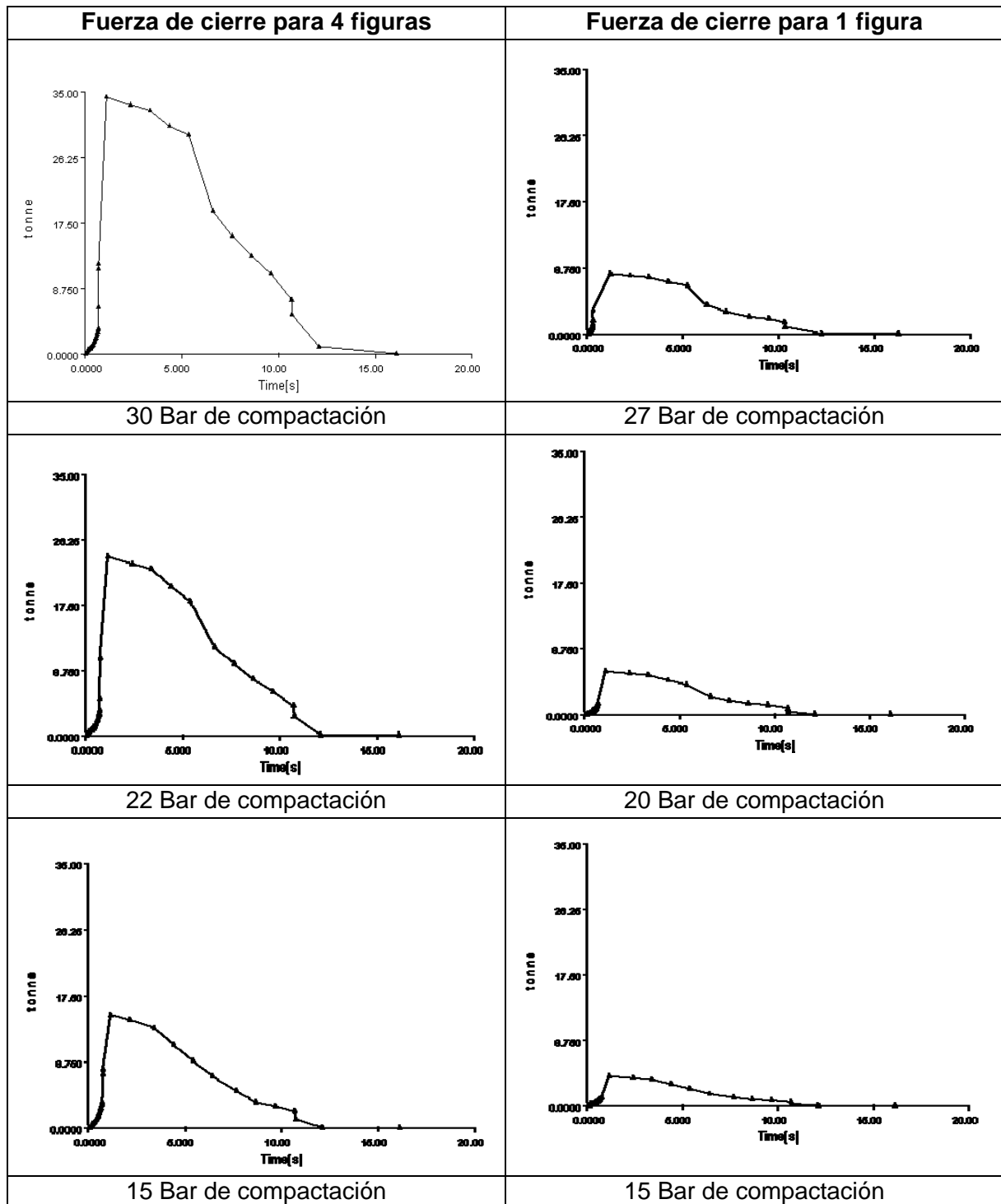


Tabla III.1. Resultado en Moldflow de fuerza de cierre para cada uno de los casos<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Moldflow da la mínima fuerza de cierre en el molde para que no se abra.

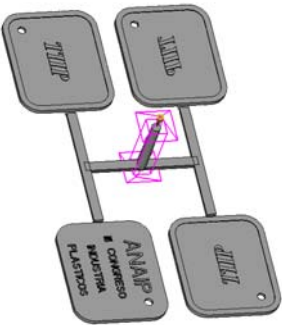
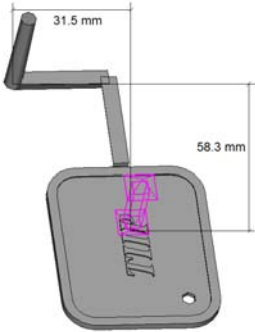
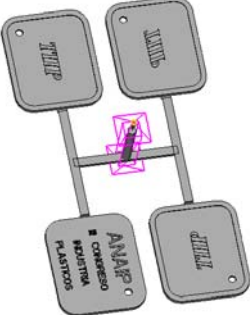
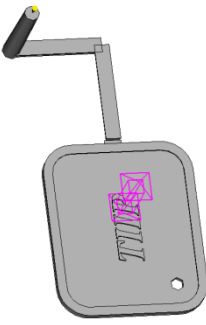
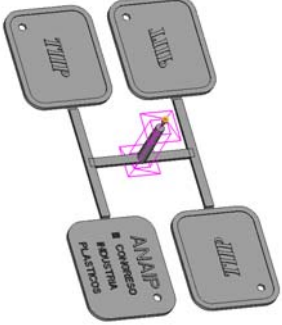
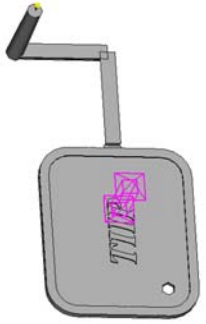
Centroide de la fuerza de cierre para 4 figuras	Centroide de la fuerza de cierre para 1 figura
	
<p>30 Bar de compactación</p> <p>Fuerza de cierre en el centroide: 34.27 Tm Presión en el centroide: 25 MPa</p>	<p>27 Bar de compactación</p> <p>Fuerza de cierre en el centroide: 7.886 Tm Presión en el centroide: 23 MPa</p>
	
<p>22 Bar de compactación</p> <p>Fuerza de cierre en el centroide: 23.98 Tm Presión en el centroide: 17 MPa</p>	<p>20 Bar de compactación</p> <p>Fuerza de cierre en el centroide: 5.686 Tm Presión en el centroide: 15 MPa</p>
	
<p>15 Bar de compactación</p> <p>Fuerza de cierre en el centroide: 14.94 Tm Presión en el centroide: 16 MPa</p>	<p>15 Bar de compactación</p> <p>Fuerza de cierre en el centroide: 4.028 Tm Presión en el centroide: 13 MPa</p>

Tabla III.2. Resultado en Moldflow del centroide de la fuerza de cierre para cada uno de los casos

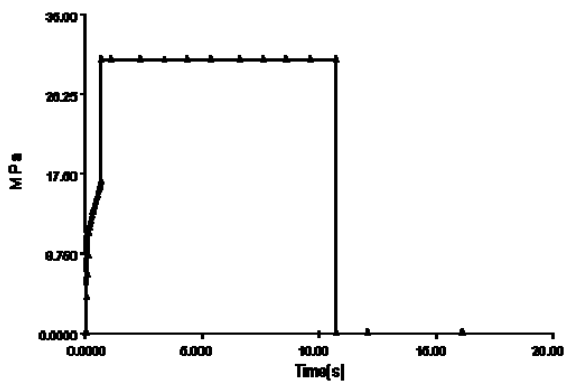
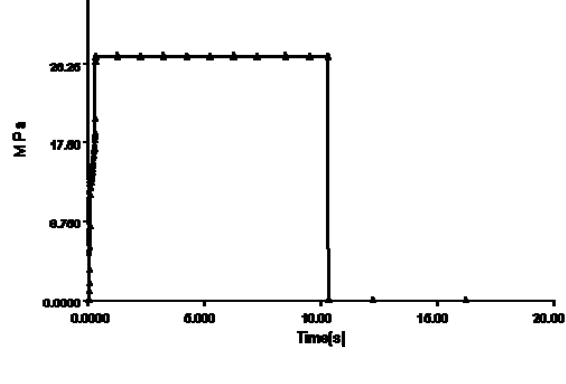
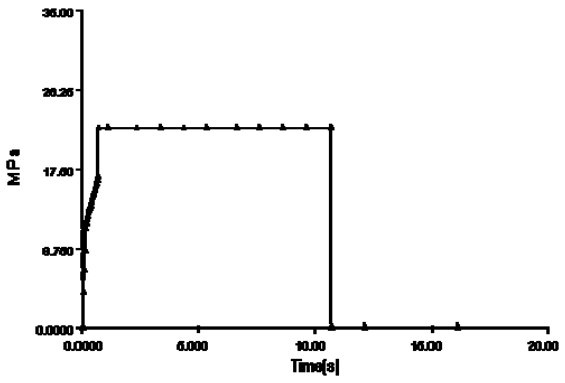
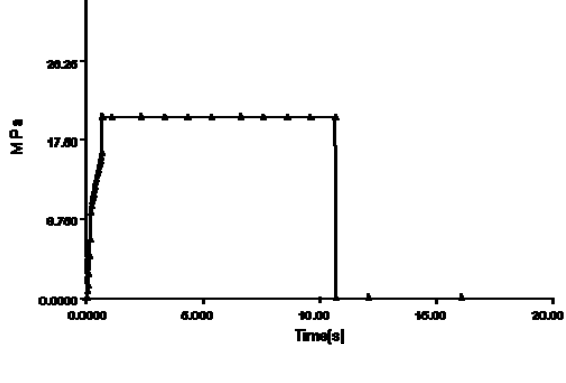
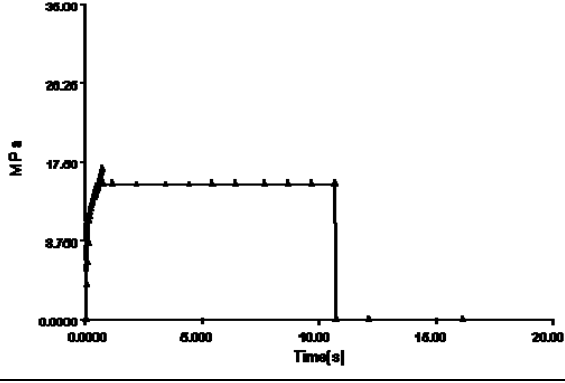
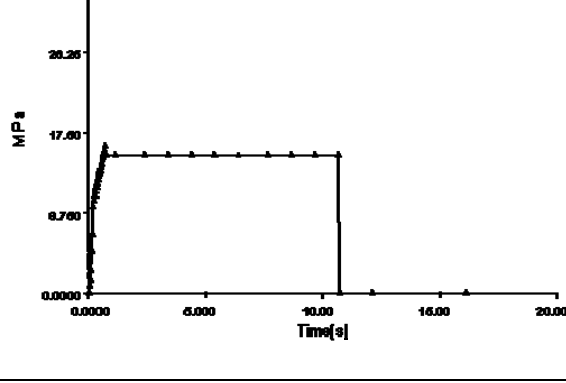
Presión en el punto de inyección para 4 figuras	Presión en el punto de inyección para 1 figura
	
30 Bar de compactación	27 Bar de compactación
	
22 Bar de compactación	20 Bar de compactación
	
15 Bar de compactación	15 Bar de compactación

Tabla III.3. Resultado en Moldflow de presión en el punto de inyección para cada uno de los casos<sup>2</sup>

<sup>2</sup> La presión de inyección debería ser igual para las mismas condiciones de inyección, tanto para una figura como para cuatro, porque lo que cuenta es el camino recorrido hasta la pieza, la fuerza sí cambia porque depende del área y ésta sí que es diferente para una figura y para cuatro figuras.

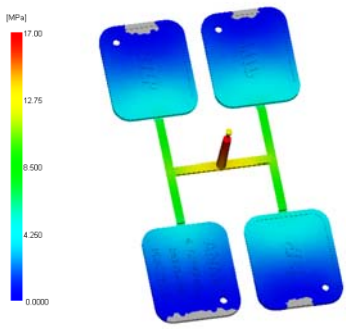
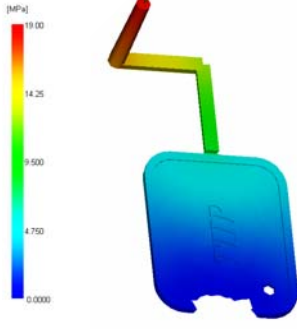
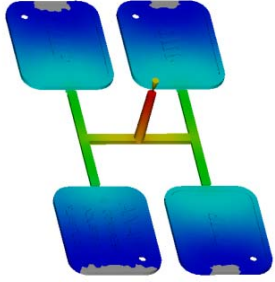
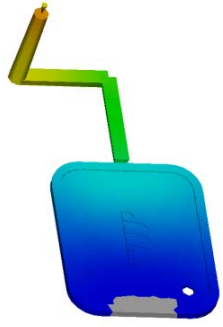
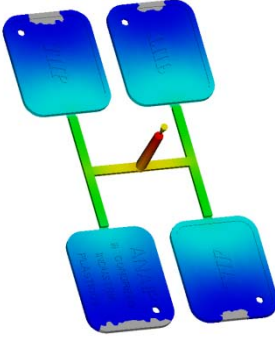

Presión en el punto de cambio para 4 figuras	Presión en el punto de cambio para 1 figura
	
30 Bar de compactación	27 Bar de compactación
	
22 Bar de compactación	20 Bar de compactación
	
15 Bar de compactación	15 Bar de compactación

Tabla III.4. Resultado en Moldflow de presión en el punto de cambio para cada uno de los casos

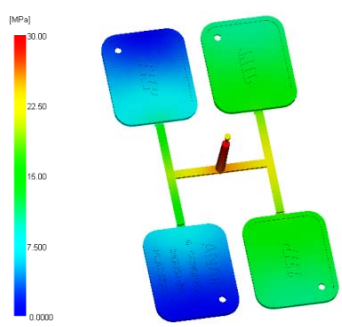
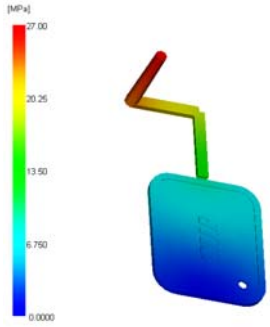




Presión al final del llenado para 4 figuras	Presión al final del llenado para 1 figura
	
30 Bar de compactación	27 Bar de compactación
	
22 Bar de compactación	20 Bar de compactación
	
15 Bar de compactación	15 Bar de compactación

Tabla III.5. Resultado en Moldflow de presión al final del llenado para cada uno de los casos



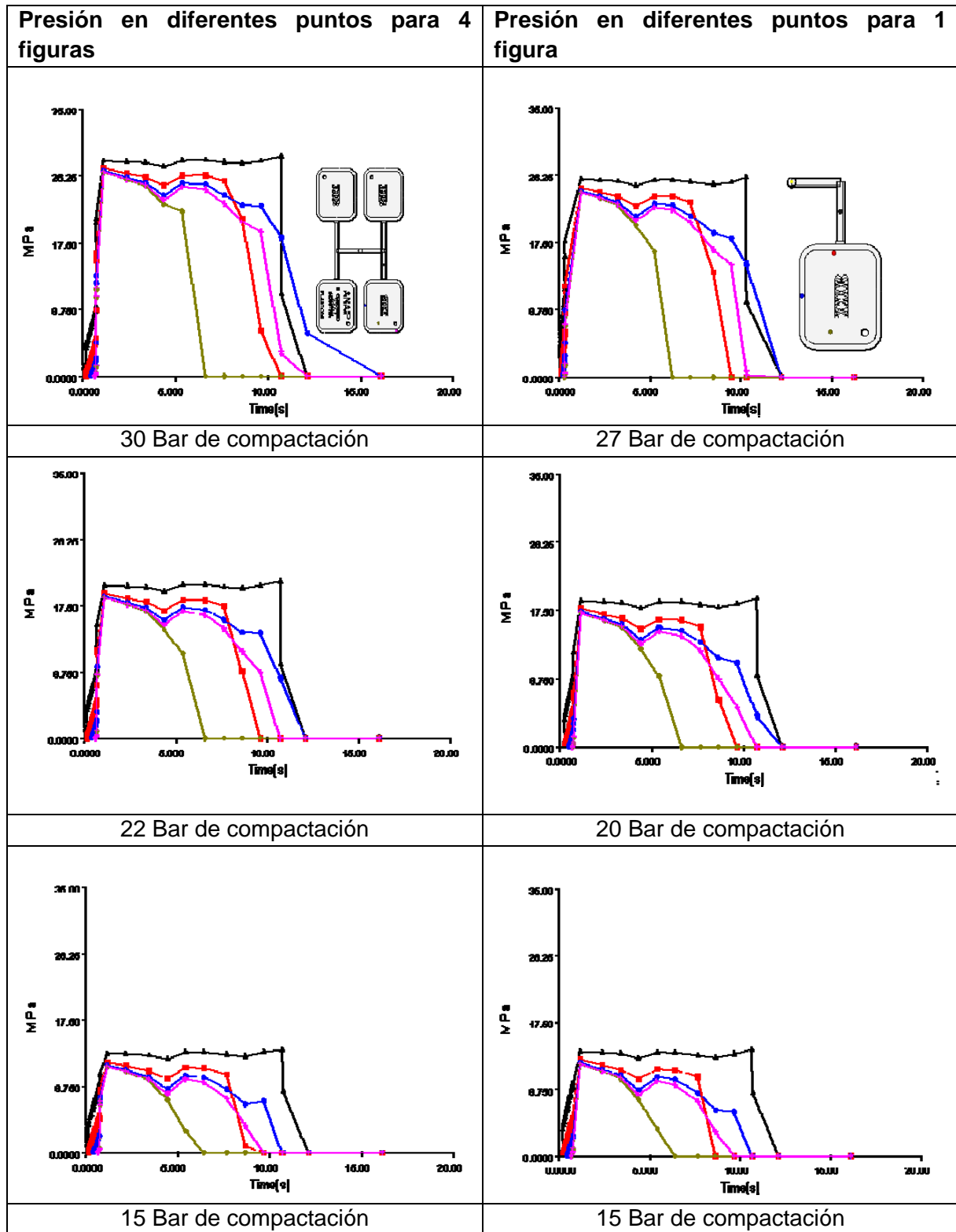


Tabla III.6. Resultado en Moldflow de presión en diferentes puntos para cada uno de los casos

### *III.1.3. Conclusiones*

En la representación de la fuerza de cierre frente al tiempo de la tabla III.1., se observa claramente, cómo desciende su valor conforme desciende la presión aplicada en la compactación, tanto para el caso de las cuatro figuras como para el caso de una figura. La fuerza de cierre en el caso de cuatro figuras es mayor que para una figura. Para las condiciones de inyección que nos ocupan y el tipo de piezas de las que disponemos, la compactación es la fase que da lugar a la máxima fuerza de cierre y, el centroide de fuerzas (tabla III.2.) se encuentra en la misma posición para los tres casos de cuatro figuras y para los tres casos de una figura.

En la representación de la presión en diferentes puntos de la pieza (tabla III.6.), las diferencias entre los distintos puntos se deben a que unas zonas enfrían antes que otras (la presión cae por enfriamiento), interesa que las presiones sean lo más uniformes posibles.

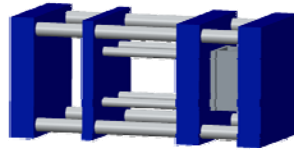
## ***III.2. Modelado mecánico en Pro/Mechanica de las unidades de cierre***

### *III.2.1. Proceso de creación del modelo de la máquina inyección en Pro/Engineer y simplificaciones realizadas*

Una vez analizada la transmisión de fuerzas a lo largo de la máquina de inyección Mateu&Solé 55Tm del T.I.I.P., y cómo se ven afectadas las partes de las que consta, se deducen las que más sufren durante la inyección de una pieza y éstas son las que forman parte de un primer modelo a simular en Pro/Mechanica. Se prescinden de partes intermedias que únicamente transmiten las fuerzas de un punto a otro de la máquina, pero realmente no influyen apreciablemente en el resultado que se desea observar en las columnas exteriores de la máquina.

Se seleccionan las piezas cuya rigidez es más relevante. Se reduce el número de elementos sustituyendo las piezas geométricamente complicadas (demasiado detalladas, con diámetros y redondeos pequeños), a fin de evitar fallos del programa, por otras sencillas pero estructuralmente equivalentes y de rigidez idéntica a las originales, y se resuelven los problemas de piezas cercanas pero no tangentes ampliando la distancia entre ellas procurando que afecte en lo mínimo a los cálculos.

La diferencia entre tener en cuenta todas las piezas que intervienen en la unidad de cierre y tener en cuenta las más relevantes es mínima, por lo que en el modelo para el análisis sólo se va a considerar como piezas de cierre los siguientes elementos ensamblados:



*Figura III.3. Máquina de inyección de 55 Tm MATEU&SOLÉ*

- Un conjunto que representa los extremos de la máquina
  - el plato de cierre
  - el plato de inyección con el amarre y la mitad del molde correspondiente
  - las cuatro columnas exteriores
- Un conjunto que representa las partes móviles de la máquina
  - el plato intermedio
  - el plato móvil con el amarre, el regle y la mitad del molde correspondiente
  - las cuatro columnas intermedias

Para poder visualizar cada una de las piezas dibujadas en Pro/Engineer, consultar el anexo ii – Resultados de los métodos teóricos.

Para realizar el modelo se han extraído las dimensiones necesarias de la hoja de características de la propia máquina o se han medido directamente con ayuda de metro y pie de rey.

Las piezas a producir en la máquina, tienen un espesor muy pequeño (el mayor que se da en estas piezas es de 2.5 mm), luego se va a considerar una superficie en las paredes del molde, resultado de considerar la pieza proyectada sobre dichas paredes, en la que se aplican las fuerzas o presiones pertinentes, en lugar de hacer cavidades en las paredes del molde.

### *III.2.2. Simulación mecánica de la unidad de cierre en Pro/Mechanica*

#### Descripción de las condiciones de contorno

- Desplazamiento nulo en cualquier dirección en la pared del plato de cierre (en un círculo de 200 mm de diámetro)
- Desplazamiento nulo en la dirección vertical para una esquina inferior del plato de cierre
- El material asignado para las partes de la máquina es el acero (en la realidad este material es una combinación de acero y bromo o acero y cromo, que ofrece alta resistencia a la vez que cierta elasticidad)

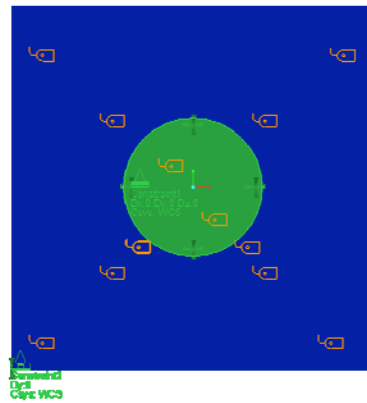


Figura III.4. Máquina de inyección sometida a las condiciones de contorno, vista desde el plato fijo

### Definición de los casos

#### 1. Ensayo de cierre en vacío

Se aplica la fuerza de cierre directamente sobre una superficie en forma de corona circular, en el plato de cierre, que representa la transmisión de la fuerza de cierre que hace el cilindro acoplado a dicho plato. El valor de esta fuerza es de:

$$55 \text{ Tm} \cdot 9.8 \frac{\text{N}}{\text{kg}} \cdot 1000 \frac{\text{kg}}{\text{Tm}} = 539000 \text{ N}.$$

Se aplica la misma fuerza de cierre sobre una superficie circular, en el plato intermedio, como representación de la fuerza que transmite el cilindro acoplado a él.

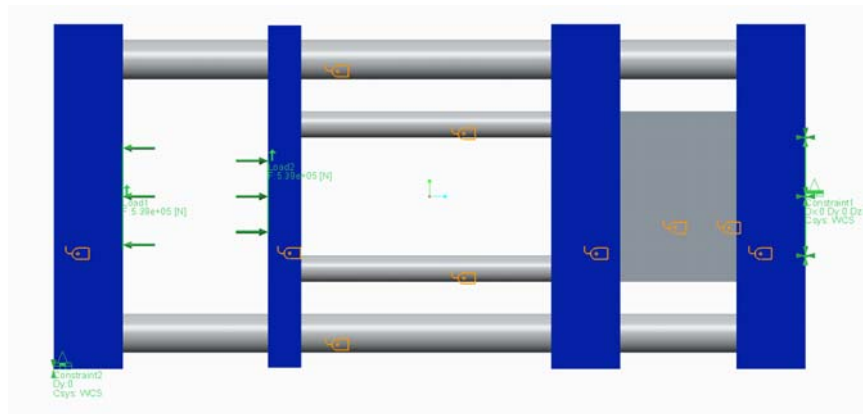


Figura III.5. Máquina de inyección sometida a las condiciones del ensayo en vacío

2. Ensayo de cierre e inyección, a 27 Bar de presión, para una figura: Transmisión de la fuerza de cierre igual al caso anterior. Esta vez la presión (27 Bar) se aplica sobre la superficie correspondiente a un llavero.

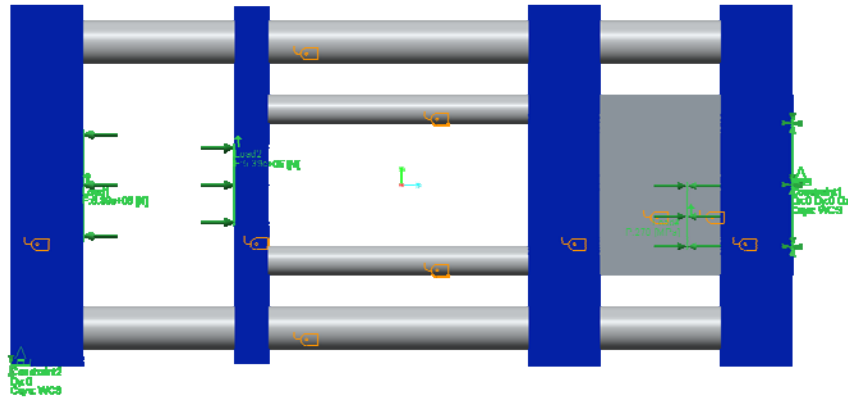


Figura III.6. Máquina de inyección sometida a las condiciones del ensayo de cierre e inyección a 27 Bar, para una figura

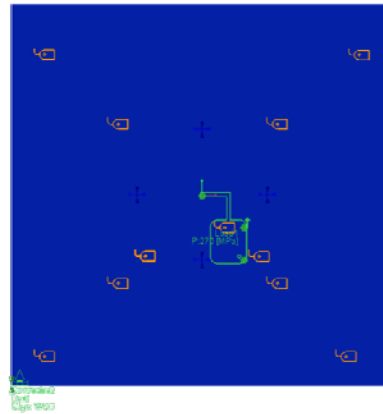


Figura III.7. Máquina de inyección sometida a las condiciones del ensayo de cierre e inyección a 27 Bar, para una figura, vista desde el plato fijo

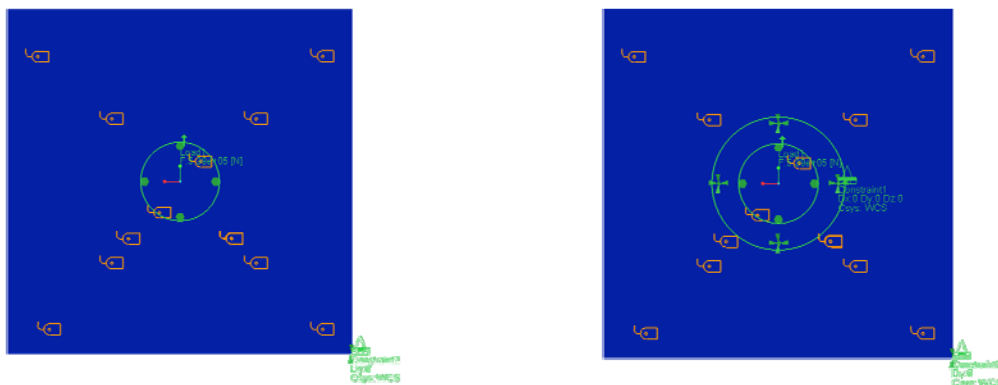
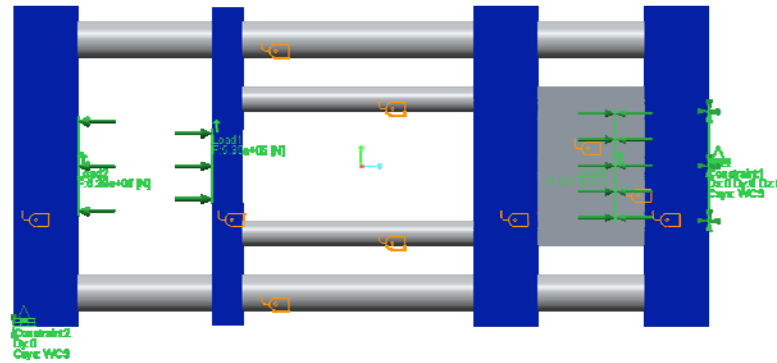
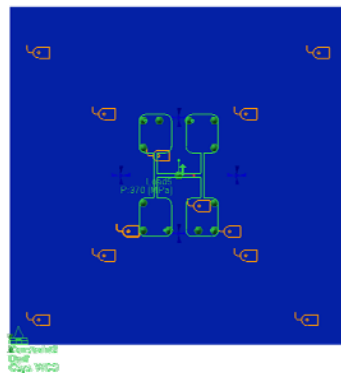


Figura III.8. Máquina de inyección sometida a las condiciones del ensayo de cierre e inyección a 27 Bar, relativas al plato móvil (izquierda) y relativas al plato de cierre (derecha), para una figura, vista desde el plato de cierre

3. Ensayo de cierre e inyección a 37 Bar de presión para cuatro figuras: A parte de la transmisión de la fuerza de cierre al plato de cierre y al plato intermedio, se tiene en cuenta la presión que ejerce el material sobre la superficie correspondiente a los llaveros (37 Bar), en las paredes del molde.



*Figura III.9. Máquina de inyección sometida a las condiciones del ensayo de cierre e inyección a 37 Bar, para cuatro figuras*



*Figura III.10. Máquina de inyección sometida a las condiciones del ensayo de cierre e inyección a 37 Bar, para cuatro figuras, vista desde el plato fijo*

## Resultados

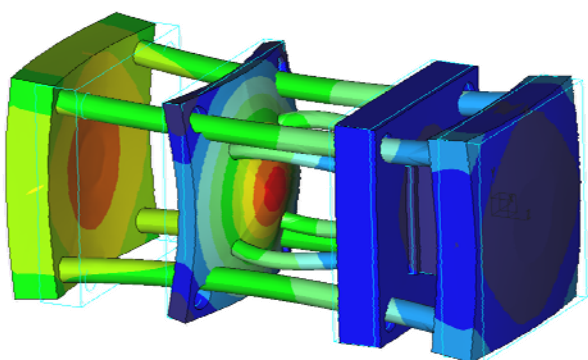
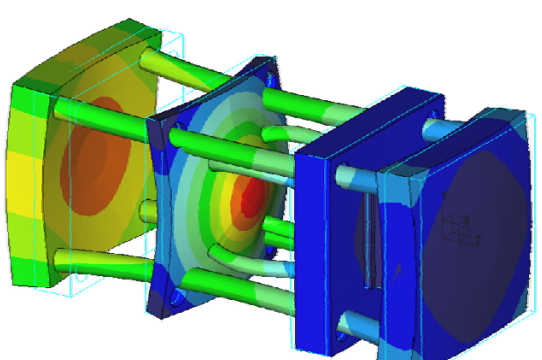
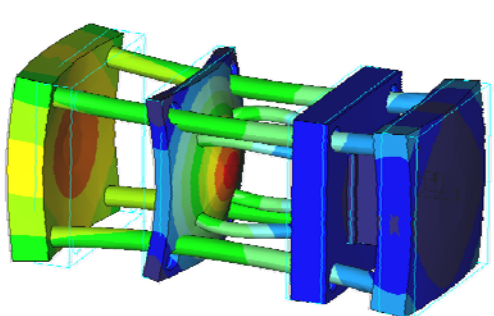
Desplazamientos (mm)	
	<p>Ensayo en vacío</p> <p>Desplazamiento máximo: 4.9549E-01 mm</p>
	<p>Ensayo con 1 figura</p> <p>Desplazamiento máximo: 4.956E-01 mm</p>
	<p>Ensayo con 4 figuras</p> <p>Desplazamiento máximo: 4.9562E-01 mm</p>

Tabla III.7. Resultado en Pro/Mechanica de desplazamientos para cada uno de los casos

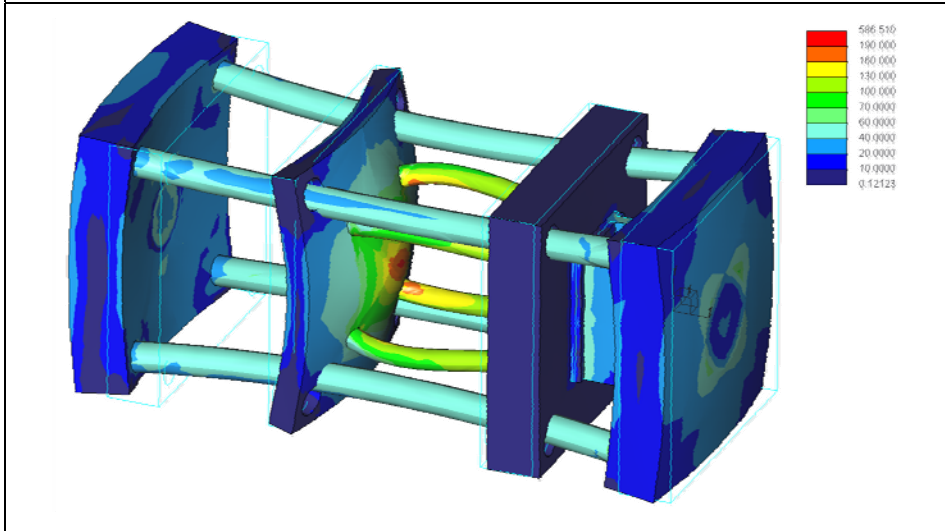
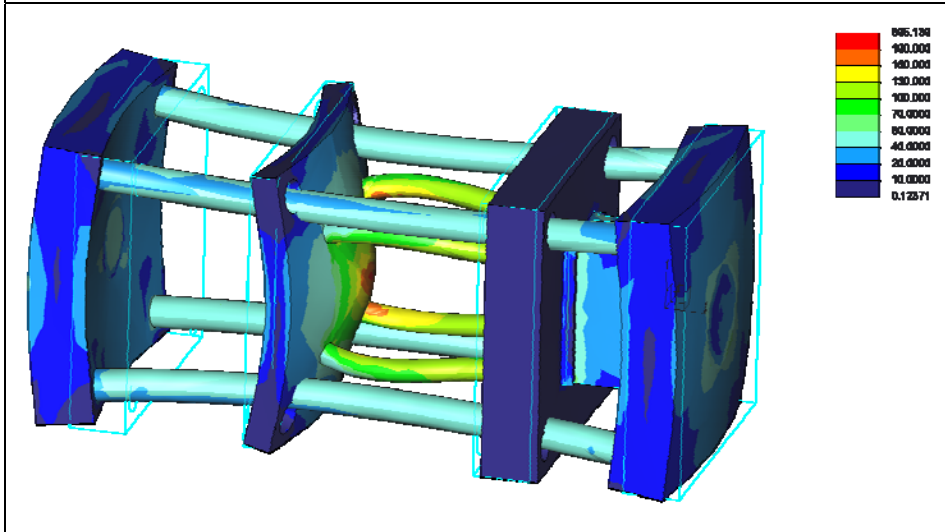
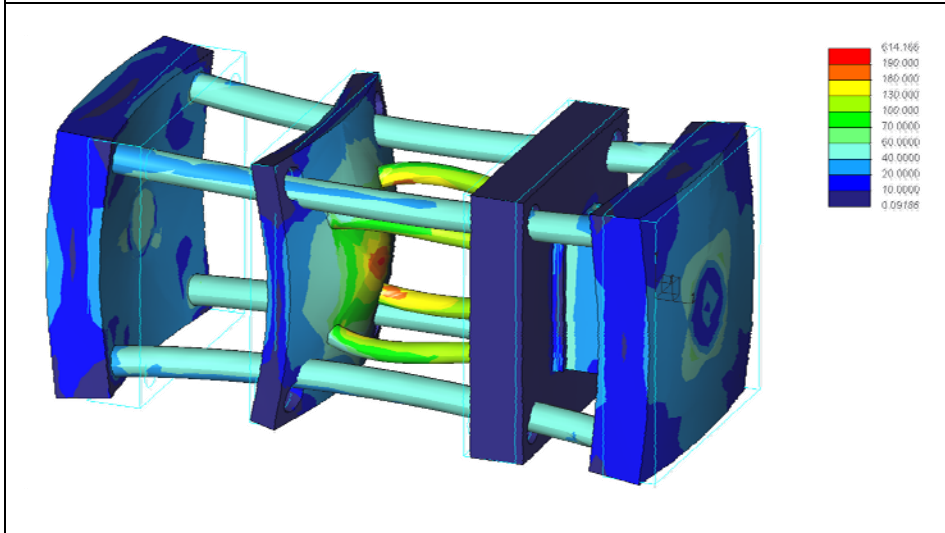
Tensiones (MPa)	
	<p>Ensayo en vacío</p> <p>Tensión máxima: 586.510 MPa</p>
	<p>Ensayo con 1 figura</p> <p>Tensión máxima: 695.139 MPa</p>
	<p>Ensayo con 4 figuras</p> <p>Tensión máxima: 614.166 MPa</p>

Tabla III.8. Resultado en Pro/Mechanica de tensiones de Von Mises para cada uno de los casos



### *III.1.3. Conclusiones*

Se observa, en la tabla III.8., que las columnas del platillo son las que realmente sufren más esfuerzos, en comparación con las columnas de los platos, que están muy sobredimensionadas. Las columnas pequeñas sufren compresión, y las grandes apenas sufren tracción. El área transversal de estas columnas es la que determina la tensión que sufren, la rigidez de las columnas externas es mayor, y a pesar de llevarse la misma fuerza de cierre, se alargan menos de lo que se acortan las columnas internas. La hidráulica del sistema lo compensa para que se equilibre, es decir, el cilindro sale lo que se acortan las columnas internas, lo que se alargan las grandes y lo que se comprime el molde.

Debido a la diferencia de rigidez entre molde y columnas, el reparto de fuerza de inyección entre ellos es tal, que apenas un porcentaje mínimo de esta fuerza va a parar a las columnas. El molde es muy rígido, con lo que apenas se aprecian tensiones en él.

El ensayo también da valores muy pequeños de variación en la geometría de las columnas exteriores (tabla III.7.), debido a lo grandes y rígidas que son para el valor de fuerza que se utiliza.



## IV - Aplicación del método experimental

---

Produciendo una pieza (de uno o cuatro llaveros) en una máquina de inyección situada en el T.I.I.P., se mide mediante unas galgas extensométricas, el estiramiento de las columnas durante el proceso, con lo que se obtienen las tensiones sobre dichas columnas. Para la adquisición de datos se necesita un amplificador para extensometría DBK43A, un módulo de adquisición de datos Daqbook/100 Series y los software Strain Gage Calibration, con el que se realiza la calibración de las galgas, y Daqview, con el que se visualiza su comportamiento. Se estudia así, cómo se reparte la fuerza de cierre entre las cuatro columnas externas.

### *IV.1. Descripción de la técnica*

La fuerza de cierre de la máquina de inyección ha de ser en todo momento mayor que el empuje del material dentro del molde.

Cuando las caras del molde se tocan, la presión en el cilindro aumenta al máximo mientras que las columnas empiezan a alargarse. Si la fuerza correspondiente a la máxima presión hidráulica es suficiente para producir una fuerza resultante que alargue las columnas, se podrá obtener la fuerza final de cierre.

Para calcular la fuerza de cierre se mide la deformación o estiramiento producido en las columnas de la máquina, debido a dicha fuerza. La fuerza de cierre transmite una tensión a las columnas. Es decir, la fuerza que cierra el molde, ejercida por el sistema hidráulico, se convierte en una fuerza de tracción en las cuatro columnas.

Según la Teoría de Resistencia y Elasticidad de los Materiales, la deformación unitaria de las columnas es

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad \text{Ecuación IV.1.}$$

luego el alargamiento

$$\Delta L = \varepsilon \cdot L \quad \text{Ecuación IV.2.}$$

siendo L la longitud inicial de las columnas.

La tensión del material es

$$\sigma = \frac{F}{A} \text{ ó bien } F = A \cdot \sigma \quad \text{Ecuación IV. 3.}$$

siendo A el área circular de la columna.

A través de su estiramiento, la fuerza a la que está sometida una columna, en un sistema equilibrado, es:

$$\frac{F}{4} = k \cdot \delta = \frac{E_{acero} \cdot A_{columna}}{L_{columna}} \cdot \delta \quad \text{Ecuación IV.4}$$

Módulo elástico

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \text{ luego } \sigma = E \cdot \varepsilon \quad \text{Ecuación IV.5.}$$

siendo E el módulo de Young.

#### *IV.1.1. Principios de la extensometría*

Las bandas extensométricas se montan solidariamente sobre el elemento en el que se quiere medir la deformación. Al deformarse el elemento se inducen variaciones en la geometría del hilo, particularmente en la longitud, que origina una variación en su resistencia eléctrica:

$$\frac{\Delta R}{R} = \varepsilon \cdot K \quad \text{Ecuación IV.6.}$$

donde  $K$  es el factor de banda propio de la galga, proporcionado por el fabricante, y  $\varepsilon$  las microdeformaciones.

Se pretende medir un esfuerzo de tracción en el sentido longitudinal de las columnas, por tanto, la galga deberán estar orientadas según ese esfuerzo. Deberá estar perfectamente unida a la columna, además de perfectamente aislada de ella.

Una explicación más ampliada de los principios de la extensometría se encuentra en el anexo iii – Resultados del método experimental.

### **IV.2. Medidas**

#### *IV.2.1. Proceso del ensayo experimental*

La descripción del proceso de preparación de los dispositivos, previo al ensayo experimental, se pueden consultar en el anexo iii – Resultados del método experimental.

A continuación se indican los pasos seguidos para realizar los ensayos para la pieza de 4 figuras y para la pieza de una figura, con la máquina de inyección del T.I.I.P. de 55 Tm.

- A) Con la máquina parada se pueden empezar a adquirir los datos correspondientes a la referencia, un voltaje distinto del cero absoluto debido a la captación de ruidos.
- B) Se toman los datos correspondientes a la máquina abierta y a la máquina cerrada para distintas presiones (30 %, 50 %, 60 % de la  $P_{m\acute{a}x}$ ), las cuales corresponden a su vez a distintas fuerzas de cierre, para observar el comportamiento del molde. En el ensayo de cierre sin inyección, todas las columnas tienen que estar cargadas por igual y no lo están, por lo que se descuenta lo que miden las bandas a las medidas que se hacen posteriormente, así se tiene una referencia y medidas reales para los siguientes ensayos. Se intenta que la fuerza de cierre sea la más adecuada para el molde, en este caso se utiliza máxima (55 Tm), para la que corresponde la presión máxima programada (175 Bar). Si se supera la fuerza

de cierre máxima, entra tanto plástico que hace que el molde se abra, y se producen rebabas.

- C) Se inyecta el molde de 4 figuras, con la correspondiente adquisición de datos durante la secuencia.

C.1.) Se programa la primera fase de inyección, con una velocidad de llenado del 50 %, con la que se obtiene una presión de llenado máxima de 37 Bar y un tiempo de llenado de 0.6 s (consecuencia del caudal de plástico inyectado). Esta fase se realiza con los mismos parámetros en todos los casos ensayados para la pieza de cuatro figuras.

C.2.) Se programa la segunda fase, correspondiente a la compactación. Se han realizado tres ensayos diferentes para la pieza de cuatro figuras, uno por cada programación diferente de la segunda fase. El tiempo de compactación es de 5 s. Casos ensayados:

- compactación al 40 % de  $P_{máx}$ , 14.8 Bar
- compactación a 60 % de  $P_{máx}$ , 22.2 Bar
- compactación a 80 % de  $P_{máx}$ , 29.6 Bar

- D) Se inyecta el molde con sólo una figura, con la correspondiente adquisición de datos durante la secuencia.

D.1.) Se programa la primera fase de inyección, con una velocidad de llenado del 50 %, con la que se obtiene una presión de llenado máxima de 27 Bar y un tiempo de llenado a 0.26 s. Esta fase se realiza con los mismos parámetros en todos los casos ensayados para la pieza de una figura.

D.2.) Se programa la segunda fase. Se han realizado otros tres ensayos diferentes para la pieza de una figura, uno por cada programación diferente de la segunda fase. El tiempo de compactación es de 5 s. Casos ensayados:

- compactación al 100 % de  $P_{máx}$ , 27 Bar
- compactación a 20 Bar
- compactación a 15 Bar

### IV.2.2. Resultados

Los cálculos necesarios y los resultados más representativos, aparecen reflejados en el anexo iii – Resultados del método experimental. Para observar la tendencia de la fuerza de cierre que se transmite a cada una de las columnas se incluyen en este apartado los casos siguientes, que son los que más afectan a la máquina:

- Llenado a 37 Bar de pieza de cuatro figuras y compactación a 29.6 Bar
- Llenado a 27 Bar de pieza de una figura y compactación a 27 Bar

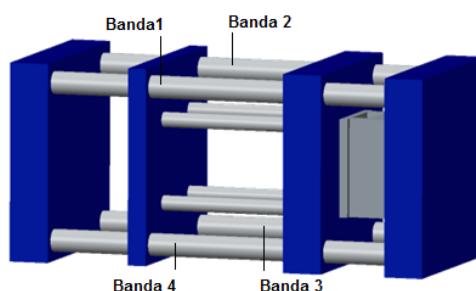


Figura IV.1. Correspondencia entre galgas y columnas

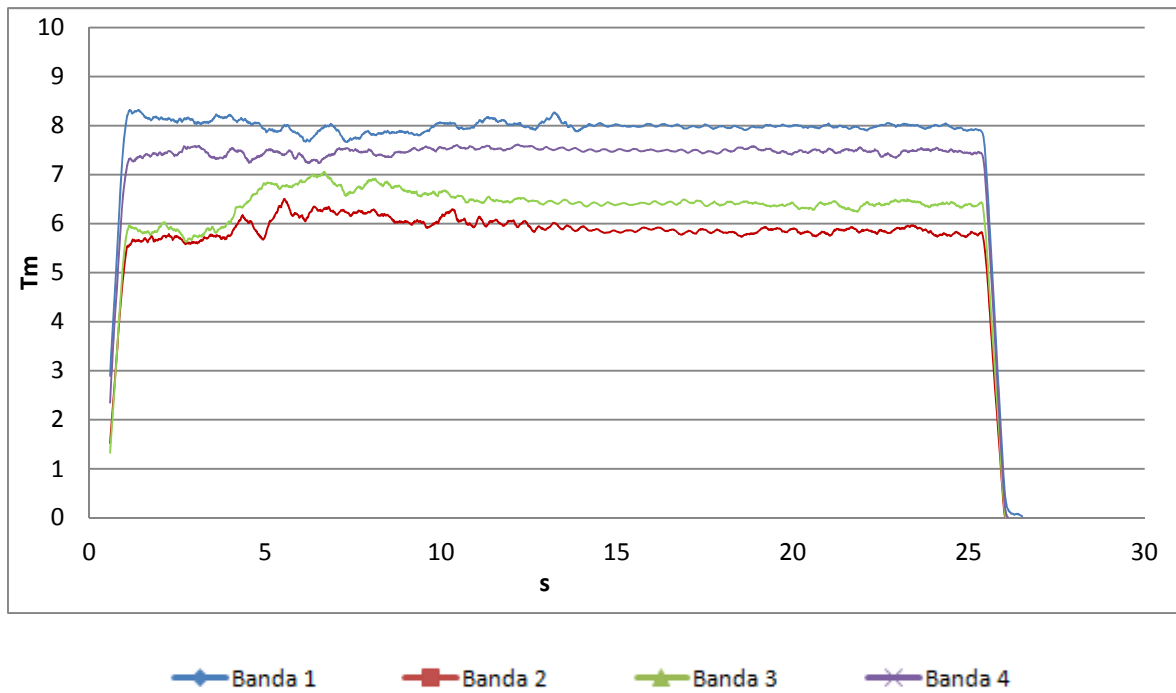


Figura IV.2. Fuerzas de cierre frente al tiempo de inyección de cuatro figuras

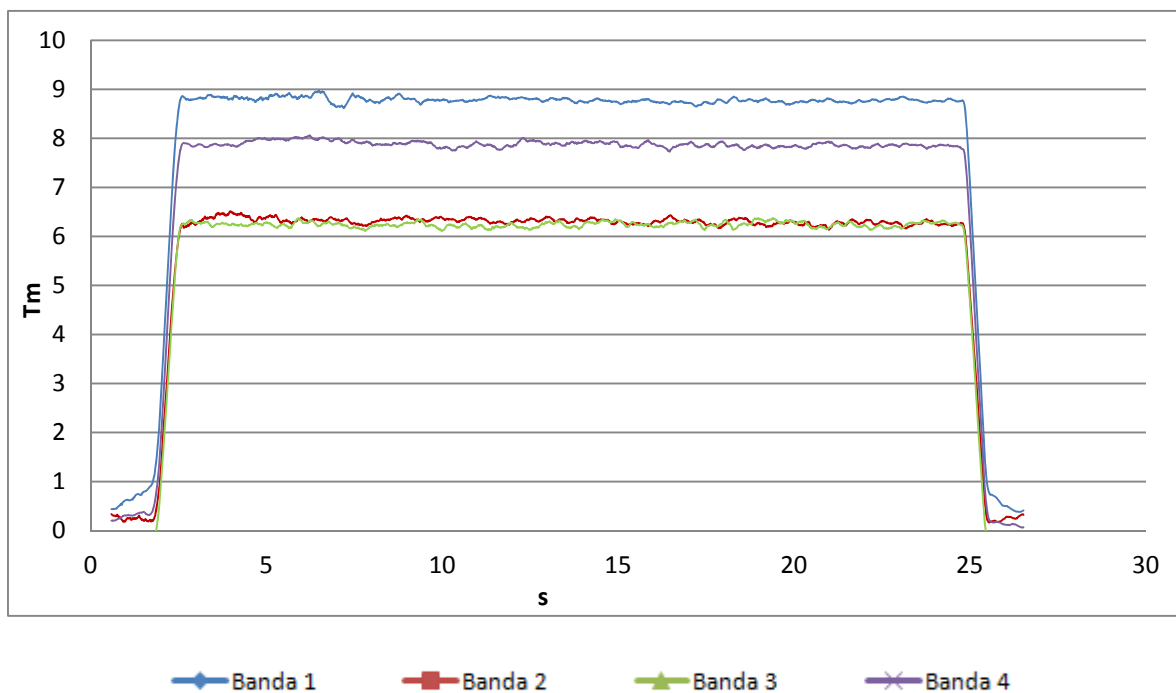


Figura IV.3. Fuerzas de cierre frente al tiempo de inyección de una figura

En los resultados se aprecia que la banda 1 (columna 1) está más cargada que las demás. Las menos cargadas son las bandas 2 y 3, cuyos valores son muy parecidos.

### *IV.2.3. Conclusiones*

Las bandas extensométricas permiten apreciar la consecuencia de las acciones de cierre, ya que durante el cierre se distribuye la fuerza sobre las columnas, pero no permiten visualizar la inyección, ya que el molde, que es mucho más rígido que las columnas, limita la fuerza de cierre que se les pueda transmitir a éstas. Las columnas a su vez, también son muy rígidas, luego la sobrecarga es mínima y no se aprecia.

El molde no está equilibrado, sus caras no son perfectamente paralelas (lo cual es muy difícil de conseguir, así como costoso), o contacta antes en unos puntos que en otros, de forma que la distribución de fuerzas no se hace por igual en todas las columnas y  $F_{\text{cierre}} \neq 4 \cdot F_i$ . Las bandas cuyos datos adquiridos sean parecidos, indican que las fuerzas que sufren las columnas correspondientes son iguales. Esto sucede con las galgas correspondientes a las columnas 2 y 3, cuyos valores registrados son muy parecidos. Se produce desequilibrio ya durante el cierre del molde, y la inyección posterior puede favorecer a dicho desequilibrio.

Al realizar un ensayo experimental, en vacío, con otro molde diferente, que se puede consultar en el anexo iii – Resultados del método experimental, se ha obtenido que los voltajes frente a las presiones medidos durante el cierre sin inyección, difieren respecto de los del molde de la pieza de los cuatro llaveros, la máquina se desequilibra de otra manera. Utilizando este otro molde también se ha podido comprobar que estaba desequilibrado por construcción.

Las gráficas que representan la fuerza de cierre que sufren las columnas frente al tiempo presentan mucho ruido, en vez de seguir una progresión suave, se producen muchos altibajos (figuras IV.1. y IV.2.). El reparto de fuerza sobre cada una de las columnas varía de una gráfica a otra.

Conforme se enfría la pieza, debería disminuir la sobrecarga de las columnas, ya que en ese momento no hay inyección. Para poder observar lo que realmente ocurre en las columnas es necesario hacer un filtrado de datos y observar la gráficas de fuerza frente a tiempo, segundo a segundo. Se puede observar que al aplicar una mayor presión de compactación el sistema tiende a la apertura del molde y se descarga más hacia las columnas más desequilibradas o las que menos fuerza de cierre tienen transmitida.





## V – Aplicación industrial

---

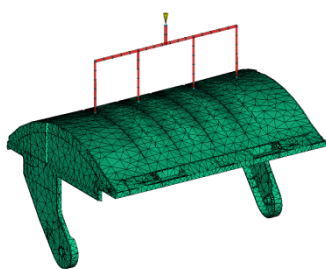
Para poder observar cómo se comporta la máquina a otras escalas, se ha querido hacer el mismo análisis teórico que con el molde de los llaveros, pero para el molde correspondiente a una tapa de contenedor de basura de 1100 l. El objetivo era comparar el caso de la tapa con una modificación y sin ella. Sólo se ha podido realizar la simulación en Moldflow, y se aprecia que para obtener piezas con cualidades similares hay que aplicar condiciones diferentes.

### ***V.1. Simulación de llenado y compactación en Moldflow***

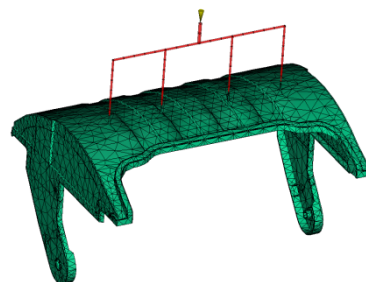
Se ha realizado la simulación correspondiente a la inyección de una tapa de contenedor de 1100 l de Contenur. Se quiere hacer una modificación sobre esta tapa, una abertura en la parte frontal. El objetivo es analizar cómo afecta a la inyección esta modificación de la geometría original.

Una vez obtenida la geometría, se exporta en formato \*.igs al programa de simulación Moldflow. Este programa, trabaja con superficies sin espesor, en este caso se trabaja en Dual Domain. Se diseñan los canales de entrada. Los canales dibujados, están compuestos de cámara caliente y de entrada.

La geometría de la pieza, una vez diseñados los canales de entrada y hecho el mallado, con un tamaño de malla que permita reproducir fielmente la pieza a la vez que obtener resultados más ajustados (aproximadamente un tamaño de triángulos de 60 mm), tiene el siguiente aspecto:



*Figura V.1. Geometría de pieza obtenida en Moldflow para la inyección de tapa sin abertura*



*Figura V.2. Geometría de pieza obtenida en Moldflow para la inyección de tapa con abertura*

#### ***V.1.1. Parámetros de estudio***

Se definen los casos en Moldflow. Para ello se introducen los parámetros de la máquina correspondientes. Se van a analizar dos casos, la inyección de la tapa sin abertura y la inyección de la tapa con abertura.

La fuerza de cierre que se aplica es la máxima de la máquina (2600 Tm), la necesaria para que no se abra el molde. No se disponen de los datos exactos con los que se inyecta la tapa sin abertura, de modo que se introducen unos parámetros con los

que se pueda analizar el problema, y que den lugar a el resultado deseado para cada pieza.

El material utilizado es Eraclene MM74: Polimeri Europa, se encuentra a 260 °C.

Ésta es una pieza gruesa que se inyecta con una programación diferente a la pieza de los llaveros.

Las diferentes condiciones de inyección empleadas para cada uno de los casos son las siguientes:

### Condiciones inyección tapa sin abertura:

- El tiempo de llenado es 40 s.
- Volumen de llenado al 90 %.
- La velocidad y la compactación se programan del siguiente modo:

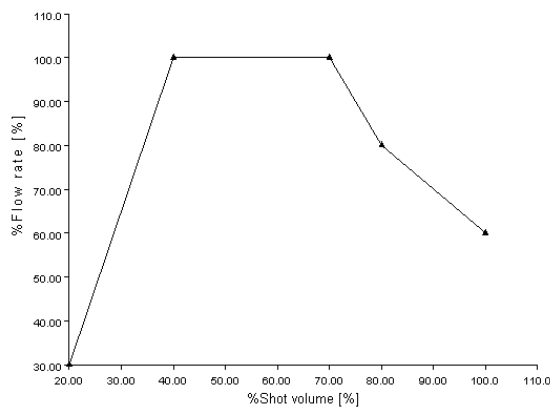


Figura V.3. Perfil de velocidad

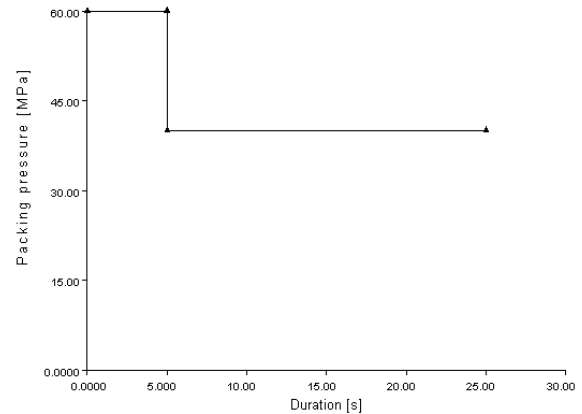


Figura V.4. Perfil de compactación

### Condiciones inyección tapa con abertura:

- El tiempo de llenado es 40 s.
- Volumen de llenado al 90 %.
- La velocidad y la compactación se programan del siguiente modo:

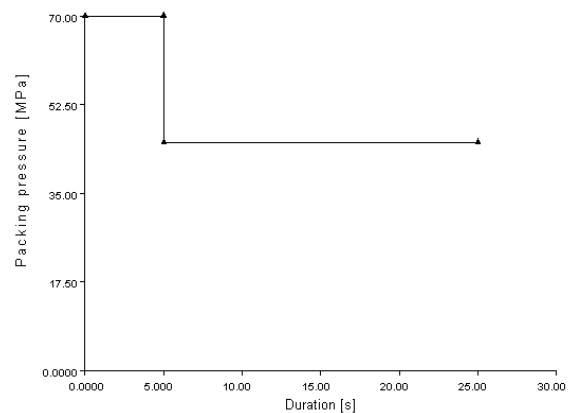
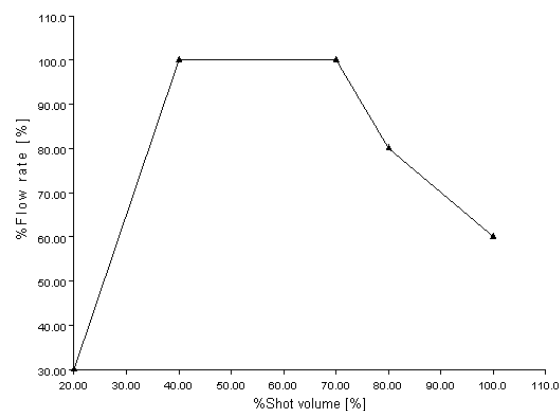


Figura V.3. Perfil de velocidad (izquierda), perfil de compactación (derecha)

### V.1.2. Resultados

Los resultados obtenidos de la simulación en Moldflow son los siguientes:

- Distribución del llenado en diferentes momentos
- Presión en el punto de cambio de fase
- Presión en el punto de inyección
- Presión máxima
- Distribución de presiones
- Evolución de la presión, en los nodos más representativos
- Distribución de las temperaturas al final del llenado
- Evolución de la temperatura promedio, en los nodos más representativos
- Fuerza de cierre a lo largo del ciclo
- Centroide de la fuerza de cierre
- Líneas de soldadura
- Contracción volumétrica
- Alabeo

De cara a este proyecto se van a analizar los resultados correspondientes a las presiones y la fuerza de cierre. El resto de los resultados pueden observarse en el Anexo correspondiente a Aplicación Industrial.<sup>1</sup> A continuación se presentan los resultados principales obtenidos con Moldflow:

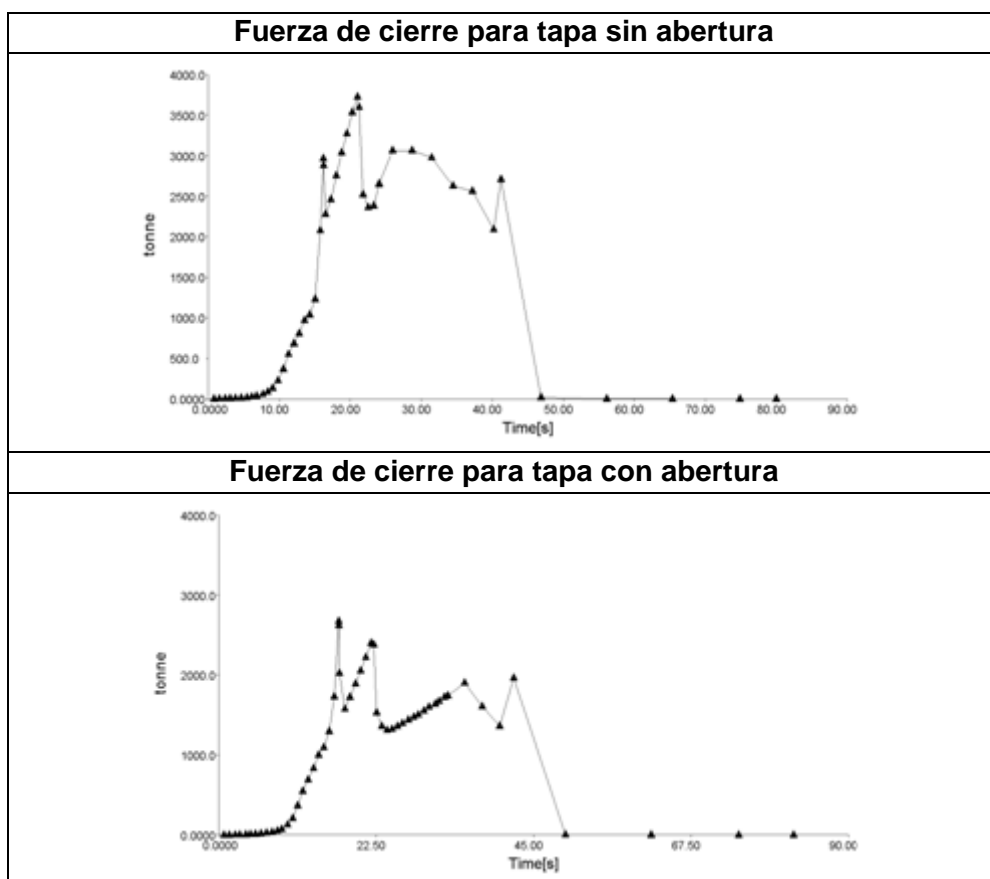


Tabla V.1. Resultado en Moldflow de fuerza de cierre para cada uno de los casos

<sup>1</sup> Aunque en un principio se pretendía realizar un análisis similar al de la pieza de cuatro figuras, la falta de datos necesarios ha hecho que sólo se pudiera realizar esta simulación en Moldflow, no pudiendo realizar la simulación en Pro/Mechanica.

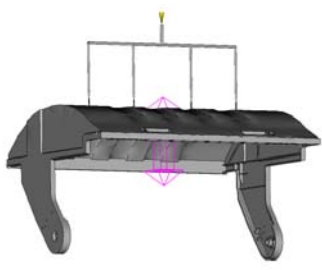
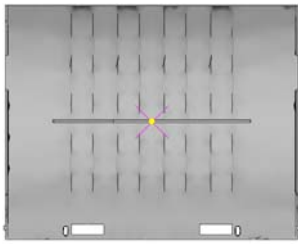
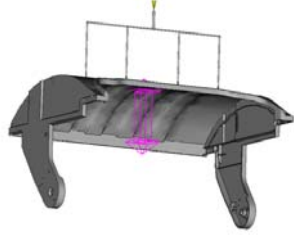
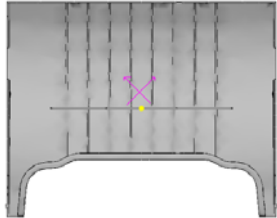
Centroide de la fuerza de cierre para tapa sin abertura	
	
Centroide de la fuerza de cierre para tapa con abertura	
	

Tabla V.2. Resultado en Moldflow del centroide de la fuerza de cierre para cada uno de los casos

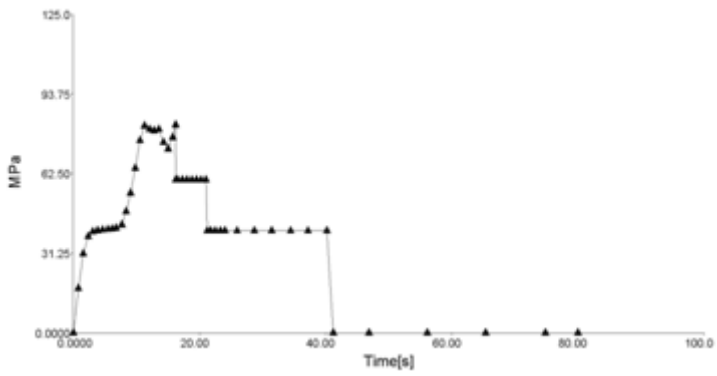
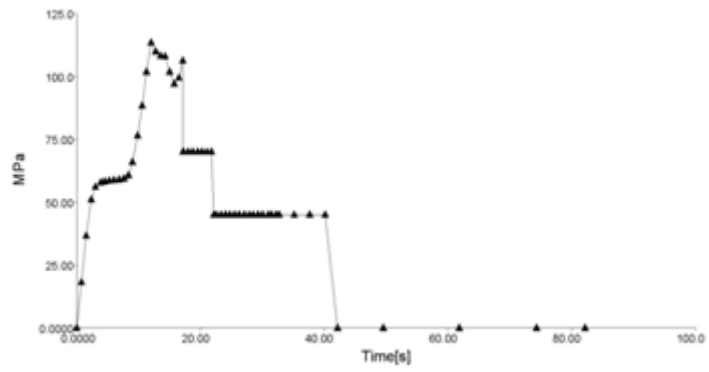
Presión en el punto de inyección para tapa sin abertura

Presión en el punto de inyección para tapa con abertura


Tabla V.3. Resultado en Moldflow de presión en el punto de inyección para cada uno de los casos

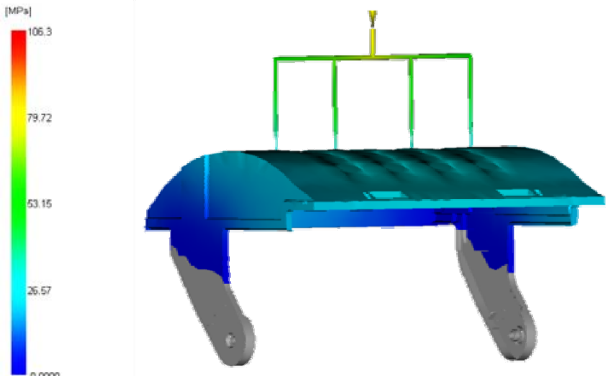
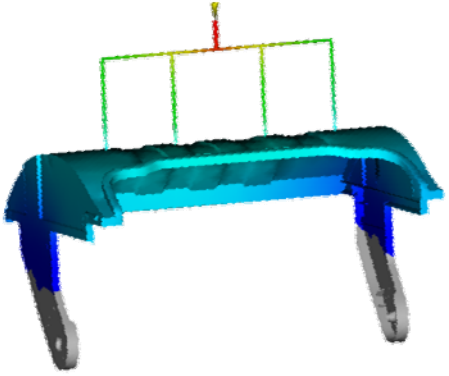
Presión en el punto de cambio para tapa sin abertura	Presión en el punto de cambio para tapa con abertura
<p>Pressure at V/P switchover = 106.3[MPa]</p> 	

Tabla V.4. Resultado en Moldflow de presión en el punto de cambio para cada uno de los casos

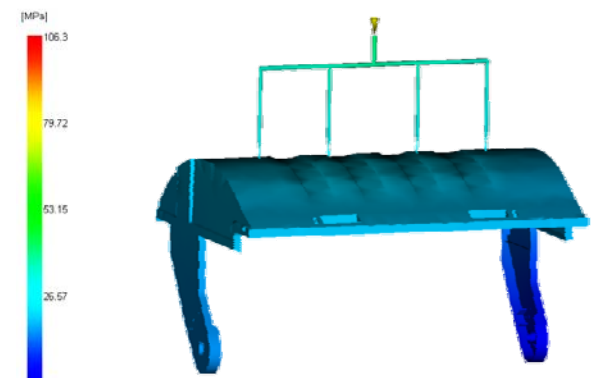
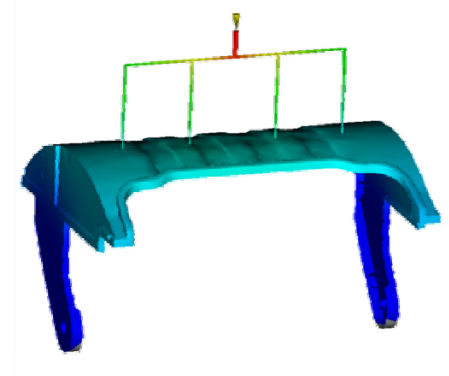
Presión al final del llenado para tapa sin abertura	Presión al final del llenado para tapa con abertura
<p>Pressure at V/P switchover = 106.3[MPa]</p> 	

Tabla V.5. Resultado en Moldflow de presión al final del llenado para cada uno de los casos

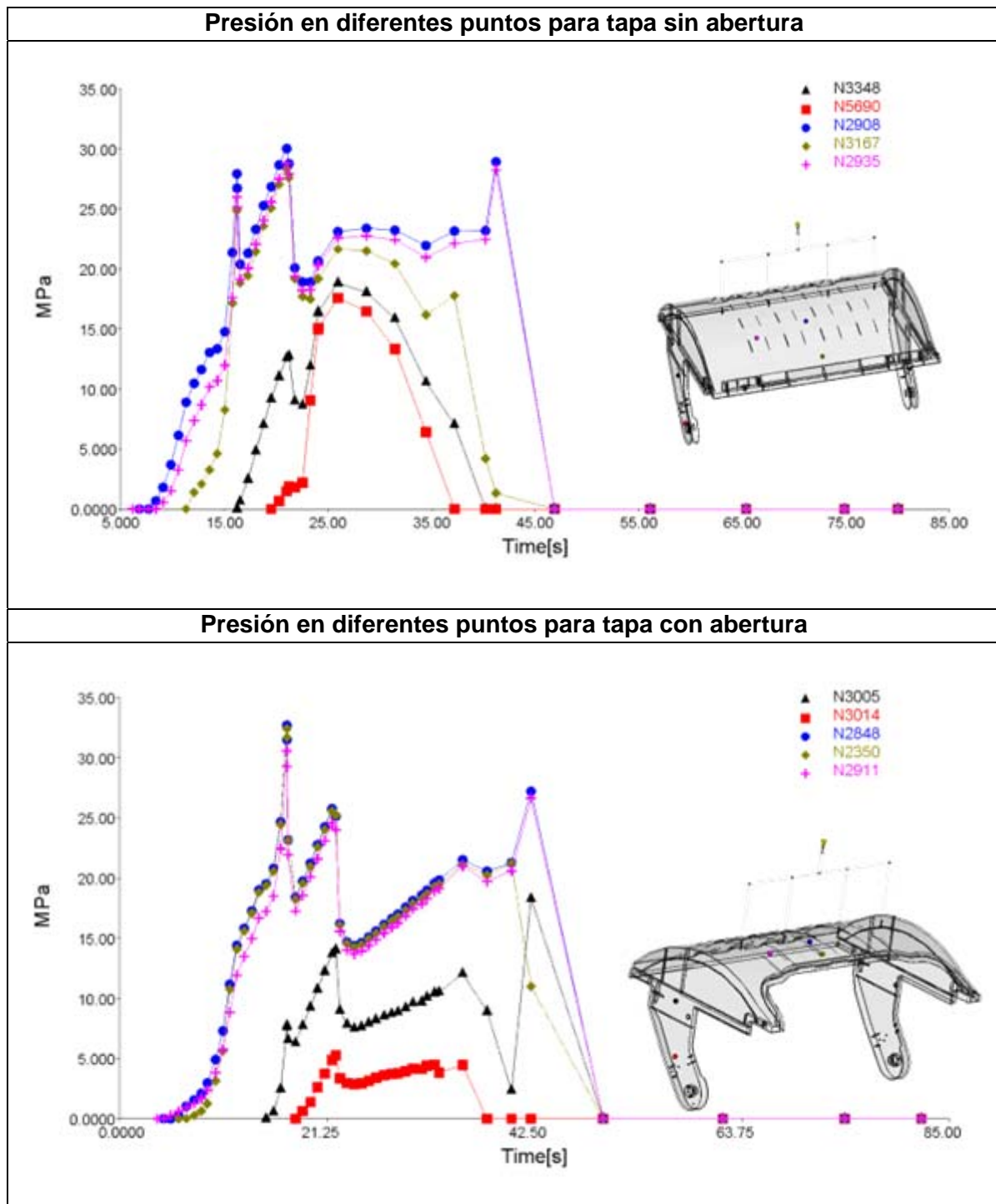


Tabla V.6. Resultado en Moldflow de presión en diferentes puntos para cada uno de los casos

## VI – Conclusiones

---

A lo largo del desarrollo de este proyecto se han ido obteniendo las siguientes conclusiones:

- ☒ Mediante extensometría no se puede apreciar el proceso de inyección debido a la gran diferencia entre la rigidez del molde y la de las columnas, de forma que una gran parte de la fuerza generada durante la inyección se contrarresta con el molde en una relación 33.7 al molde frente 1 a las columnas.
- ☒ Como consecuencia de lo anterior, no se pueden observar los efectos de la inyección sobre el cierre mediante los métodos experimentales utilizados, solo se pueden observar por métodos teóricos.
- ☒ Por otro lado, la extensometría permite ver, el reparto de la fuerza de cierre entre las diferentes columnas, debido a la falta de un cierre homogéneo y uniforme entre ambas mitades del molde.
- ☒ El descentramiento de las acciones debidas a la inyección, solo puede ser determinado por simulación.
- ☒ Durante la realización del proyecto he aprendido a utilizar distintos dispositivos y programas, entre ellos:
  - Pro/Engineer y su aplicación de Pro/Mechanica (Creo 1.0)
  - Autodesk Moldflow Synergy 2012
  - Strain Gage Calibration
  - Daqview
- ☒ También he adquirido conocimientos acerca de cómo son y cuál es el funcionamiento de las máquinas de inyección de plásticos, los factores a analizar en la producción de las piezas y los problemas asociados a la inyección tanto en el producto resultante como en la máquina.

### ***Campos de nuevos desarrollos:***

- ☐ Desarrollar un molde calibre, con el cual, mediante extensometría, se pueda asegurar la planitud entre las paredes de la máquina.
- ☐ Introducir un molde, de rigidez similar a las columnas, para poder analizar el reparto de acciones sobre ellas, incluidas las debidas al proceso de inyección, mediante extensometría.
- ☐ Realizar ensayos con máquinas con otros tipos de cierres.





## VII - Bibliografía y nomenclatura

---

### ***Bibliografía***

- [1] <http://usa.autodesk.com/moldflow/> → fecha de consulta: Junio del 2012
- [2] <http://es.ptc.com/product/creo/parametric> → fecha de consulta: Mayo del 2012
- [3] <http://www.tiip.unizar.es/> → fecha de consulta: Abril del 2012
- [4] [http://www.cad-cae.com/strain\\_gages.html](http://www.cad-cae.com/strain_gages.html) → fecha de consulta: Junio del 2012
- [5] <http://www.mccdaq.com/products/daqview.htm> → fecha de consulta: Junio del 2012
- [6] *Curso de Formación en Inyección 2012 – La Inyección desde el punto de vista de la máquina*, en el TIIP, Área de Ingeniería Mecánica de la Escuela de Ingeniería y Arquitectura (EINA), Universidad de Zaragoza
- [7] Jay Shoemaker, Editor (2006). *Moldflow Design Guide: A Resource for Plastics Engineers*. Cincinnati: Hanser Gardner Publications.
- [8] <http://www.mateusole.net/castellano/web/default.asp> → fecha de consulta: Mayo del 2012
- [9] <http://www.kyowa-ei.co.jp/eng> → fecha de consulta: Junio del 2012

### ***Nomenclatura***

#### **Letras latinas:**

$A$	Área transversal del material elástico ( $mm^2$ )
$A_p$	Área proyectada ( $cm^2$ )
$b$	Anchura ( $mm$ )
$E$	Módulo de Young del material elástico ( $MPa$ )
$F$	Fuerza aplicada a un material elástico ( $N$ )
$f$	Factor de seguridad (adimensional)
$F_c$	Fuerza de cierre de la máquina de inyección ( $Tm$ )

$h$	Altura ( $mm$ )
$k$	Constante elástica o rigidez del resorte $\left(\frac{N}{mm}\right)$
$K$	Factor de banda
$L$	Longitud del material elástico ( $mm$ )
$P$	Presión aplicada ( $Bar$ )
$r$	Radio ( $mm$ )
$R$	Resistencia ( $\Omega$ )
$s$	Superficie ( $mm^2$ )

**Letras griegas:**

$\alpha$	Ángulo (grados)
$\beta$	Ángulo (grados)
$\delta$	Variación que experimenta la longitud de un material elástico, o alargamiento ( $mm$ )
$\Delta$	Incremento
$\varepsilon$	Alargamiento unitario que experimenta un material elástico (adimensional)
$\pi$	Número Pi
$\sigma$	Tensión en el material ( $MPa$ )

**Subíndices:**

<i>acero</i>	Relativo al acero
<i>adm</i>	Mayor valor de una magnitud que admite un material
<i>amarre fijo</i>	Relativo al amarre de la mitad fija del molde
<i>amarre móvil</i>	Relativo al amarre de la mitad móvil del molde
<i>columna</i>	Relativo a la columna de la máquina de inyección
<i>columnas externas</i>	Relativo a las columnas externas de la máquina de inyección

<i>columnas internas</i>	Relativo a las columnas internas de la máquina de inyección
<i>i</i>	Índice entero identificativo de objetos (superficies)
<i>m</i>	Medio
<i>molde</i>	Relativo al molde amarrado a la máquina de inyección
<i>molde fijo</i>	Relativo a la mitad del molde fija, donde está la cavidad donde se inyecta
<i>molde móvil</i>	Relativo a la mitad del molde móvil, donde está la cavidad donde se inyecta
<i>p</i>	Proyectado
<i>sufridera</i>	Relativo a la placa sufridera del molde
<i>regle</i>	Relativo al regle del molde

